

가변 체적 헬름홀츠 공진기에 의한 유사 흡기 시스템의 비정상 유동특성 Characteristics of Unsteady Flows in a Semi-Induction System by a Variable Volume Helmholtz Resonator

강경은 · 김경현 · 강희영 · 고대권

K. E. Kang, K. H. Kim, H. Y. Kang and D. K. Koh

(접수일 : 2009년 1월 17일, 수정일 : 2009년 11월 24일, 채택확정 : 2009년 11월 25일)

Key Words : Unsteady Flow(비정상유동), Pulsating Flow(맥동류), Helmholtz Resonator(헬름홀츠 공진기), Pulse Generator(펄스 생성기)

Abstract : Unsteady flows in a semi-induction system was investigated to verify their characteristics. A semi-induction system was designed and made to verify the flow characteristics in an intake system. To attain an intact wave of an intake pulse, a single semi-intake system was adopted as a test rig. The system consists of an intake pipe and a rotary valve as a pulse generator, and a variable volume Helmholtz resonator. The variable volume Helmholtz resonator was mounted in the intake pipe to enhance a breathing capacity and engine performance. The phase and amplitude of the pulsating flow in an unsteady flow system were found to affect the charging capacity significantly. The behavior of pressure wave, their phase and amplitude were investigated in various regions. Some of the results obtained from experiments were described.

기호 설명

- A : Area of the neck of Helmholtz Resonator
- L : Length of the neck of Helmholtz Resonator
- V : Volume of Helmholtz Resonator
- a : The speed of sound
- f : Frequency of Resonance

용어설명

- CR : Close Resonator
- SR : Small Resonator
- LR : Large Resonator

1. 서 론

산업화가 가속화되면서 자동차 엔진도 눈부신 발

전을 이룩해왔다. 그 동안 엔진연구의 주 관심사는 출력향상에 집중되어 있었지만, 70년대와 80년대 두 번의 오일 파동에 의한 유가 폭등을 겪으면서 연비 향상 쪽으로 연구의 방향을 바꾸었다. 그러나 지구 온난화와 환경오염으로부터 지구를 살리기 위한 1997년 도교의정서가 체결되면서 저탄소, De-NOx 및 녹색성장을 정책으로 채택하는 나라들이 증가하면서 이산화탄소 배출량에 대한 경각심이 늘어나 의무 감축국가를 필두로 탄소배출량 규제가 시작되었고, 점차 그 대상을 확대함에 따라 우리나라도 이 문제에 많은 관심을 갖기 시작하였다. 2000년대 들어서면서 지구온난화에 따른 빙하의 감소로 기후변화와 그에 따른 자연재해가 전 세계적으로 발생함에 따라, 자동차가 현대 생활에 필수지만 각국 정부의 규제에 대응할 수 있는 저공해 자동차 생산에 주력하고 있다.

최근 국내에서도 고유가와 각종 환경 규제에 대비하여 CRDI, VVT, VGT, 공진기(resonator), 흡·배기관 튜닝 등이 성능향상을 위해 활발히 연구되어지면서 연비가 뛰어난 자동차가 많이 개발되고 있다. 그럼에도 불구하고 엔진으로부터 오염물이 다량으로 배출되는 이유는 상용회전수에서 엔진성능

고대권(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : dkkoh@pknu.ac.kr, Tel : 051-629-6195
강희영 : 부경대학교 기계공학부
강경은 : 부경대학교 산업대학원
김경현 : 부경대학교 대학원

이 최대가 되도록 설계하기 때문에 상용회전수를 벗어나는 구간의 특징은 연비 저하와 오염물 배출 수준이 높다. 따라서 이 영역에 대한 성능 개선 연구가 절실히 필요하다¹⁾.

흡·배기성능과 엔진성능과는 밀접한 관계가 있으며 특히 배기시스템의 설계는 매우 중요하다²⁾. 한편엔진의 중·저속구간에서 급기부족에 기인한 불연소 가스 배출문제가 대두되고 있으며 이를 근본적으로 개선하기 위하여 흡기시스템의 튜닝을 통한 체적효율 향상이라든지 배기시스템의 해석 등 엔진의 흡·배기 시스템의 비정상유동(unsteady flow)의 물리적 현상에 대한 명확한 이해와 해석이 무엇보다 필요하다³⁾.

종래의 연구동향은 연소 과정중의 실린더 내의 압력변화와 열 발생률 및 체적효율 향상에 따른 고속, 고출력을 발생하기 위한 연구가 주류를 이루었지만 그에 못지않게 저속회전 영역에서의 체적효율 향상과 그에 따른 배기오염물 절감에 대한 연구도 절실한 실정이다³⁻⁶⁾.

일반적으로 이론 공연비 조건에서 체적효율은 실린더 안으로 유입되는 혼합기 또는 공기 질량 유량에 비례하며 기관 출력은 체적효율에 비례한다.

체적효율의 변화 인자는 엔진의 회전속도, 흡·배기관 매니폴드의 형상, 밸브 개구면적, 밸브 타이밍 및 밸브 오버랩기간에 좌우되며 그 결과, 엔진성능, 토크특성 및 오염물 방출수준에 커다란 영향을 끼친다⁴⁾. 따라서 저속구간의 체적효율 향상을 위해서는 이러한 인자들에 관련한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구의 목적은, 과급조건하의 가변체적 헬름홀츠 공진기의 유동특성과 흡기관 안의 유동특성이 과급디젤엔진 급기 성능에 미치는 영향을 알기 위해, 복잡한 디젤엔진의 흡기관 구조를 단순화된 실험 장치로 모형을 만들어 비정상유동에 대한 이해와 더불어 엔진의 급기 성능에 미치는 영향에 대한 기초 자료를 획득하는데 있다.

2. 흡기관 안의 공기유동특성

2.1 흡기관 안의 공기 유동특성

가스가 관속에 있을 경우 그 가스는 한 개의 기체 기동으로 간주할 수 있으며 기주의 물리적 성질은 질량과 동시에 탄성을 가지므로 그의 운동은 압력진동을 수반한다.

흡입 행정에서 이상적인 밸브 개폐 시기는, 밸브

닫힘은 피스톤이 BDC에 도달하였을 때 이루어져야 하지만, 실제로는 바로 닫히지 않고 피스톤이 압축 행정을 위해 다시 올라가기 시작하는 시점에도 밸브는 열려 있다. 이것이 바로 위에서 언급한 유입공기의 관성을 이용하기 위함이다. 이 때에, 흡기관 내부의 기주의 진동을 피스톤의 운동에 동조시키면, 공진현상을 일으켜서 실린더 내로의 공기 유입량이 많아지고 체적효율이 증가하게 된다. 엔진이 고속일 때 유체의 빠른 관성으로 인하여 체적효율을 높일 수 있는 관성 램프와 정상파(standing wave)의 크기와 위상을 이용하여 체적효율을 높일 수 있는 파동 램프가 있다. 흡기관의 파동은 위상과 진폭의 조정이 가능하고 보통의 범위 안에 항상 같이 존재한다⁷⁾.

흡·배기관 속을 진행하는 파의 유동특성은 양방향성을 갖고 전파되는데 압력파인 전진파와 팽창파인 후진파로 구분할 수 있다. 흡기시스템에서 파의 생성은 엔진 구동 시 피스톤의 하강으로 인하여 부압파가 형성되고 이 파가 흡기관의 열린 끝에서 반사되어 되돌아올 때는 위상이 뒤바뀌어 정압파가 되며 두 파가 중첩이 되어 사인곡선 형태(sinusoid)의 파를 형성한다.

Fig. 1은 펄스발생기의 설계도면이다. 실제의 대기통 엔진에서는 인접 실린더의 간섭에 의한 영향으로 흡기관안의 공기 유동은 더욱 맥동이 심하게 되어 해석이 곤란하다. 엔진에서 피스톤과 밸브에 의하여 발생되는 맥동과 같은 효과를 내기 위해 펄스 발생기(pulse generator)를 장착하였다.

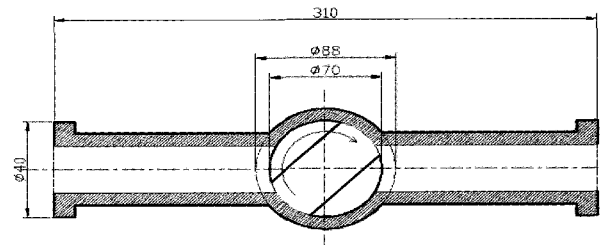


Fig. 1 Schematic diagram of the pulse generator

2.2 헬름홀츠 공진기

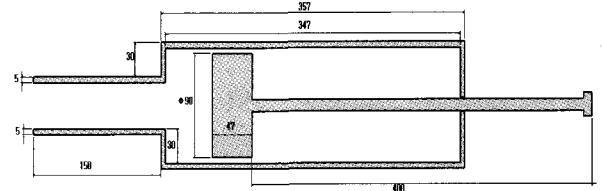


Fig. 2 Schematic diagram of the Helmholtz Resonator

공진기는 목과 체적으로 구성되며 Fig. 2는 공진기의 개략도이다. 흡기 시스템에서 사용되는 헬름홀츠 공진기 모델은 흡기 행정에서 피스톤의 움직임에 의하여 형성된 실린더 속의 진공이 파이프속의 공기의 질량을 가속시킴으로서 공진기 목 안의 기주의 진동이 흡입 작용에 가담하면서 공기 질량 유동률에 변화를 주고 결국 체적효율에 영향을 끼친다. 이 모델은 자유도의 수에 따라서 자유도 개수만큼의 공진회전수 피크를 갖는 것으로 알려져 있다. 공진기를 부착하는 경우 고유진동수를 더 낮게 해줌으로써 공진의 기회가 더욱 많아진다. 이 시스템의 장점은 흡기관의 길이를 길게 연장하지 않아도 특정 영역 특히 저속구간 및 과도기 체적효율을 개선시킬 수 있는데 있다. 일반적 공진기의 고유진동수를 구하는 식은 아래와 같다.

$$f_{reso} = \frac{a}{2\pi} \sqrt{\frac{V}{AL}} \quad (1)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험장치

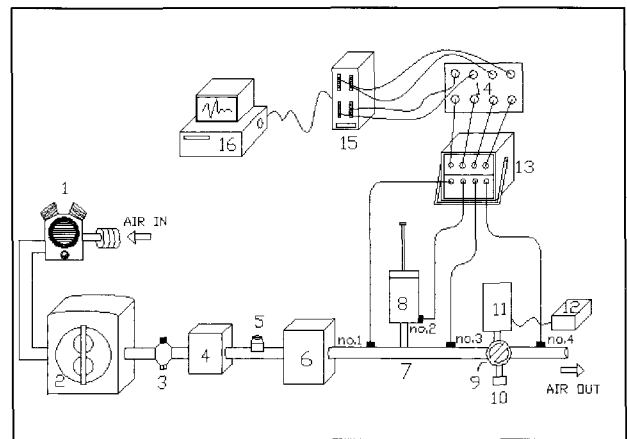
Fig. 3은 실험에 사용된 장치의 개략도이다. 가변 헬름홀츠 공진기를 부가한 유사 흡기시스템을 만들었다. 압축 공기는 스크류 펌프에서 생산되어 저장조에 저장된다. 이 공기는 감압 밸브를 거치면서 실험에 적합하게 조절되고 오리피스 유량계와 서지탱크, 유사 흡기관, 공진기 그리고 펄스발생기를 차례로 거치고 출구 파이프를 거쳐 대기로 방출된다.

압축기(GA22, screw type, 28.8kW, 3525 rpm)는 공기압축 압력이 8.6 bar이다. 시스템 내부를 흐르는 공기의 압력 맥동을 계측하기 위하여 피에조 저항식 저압 압력변환기(Kistler, 4045A5, Switzerland)와 증폭기(Kistler, 4603)를 사용하였고, 유사 흡기관, Variable Helmholtz Resonator(VHR), 실린더 몸통부분, 펄스발생기 입·출구 측에 각각 압력변환기를 설치하여 압력변동을 측정하였다. 기압은 1009 hPa이다.

유사 흡기관의 형상은 내경 40 mm이며 전체 길이는 2830 mm인 직관 구조를 갖고 있다. 감압밸브를 거친 후 압축 공기의 불규칙성을 제어하고자 서지탱크(70ℓ)를 제작하였고, VHR은 공진기 실린더 부분에 피스톤을 넣어 수동으로 공진기 체적을 변

화시킬 수 있게 제작하였다. 그리고 펄스 발생기를 회전 시켜주는 전동기는 노이즈 방지를 위해 직류 전동기를 사용하였고 제어기로 회전속도를 조절한다. rotary encoder를 로터리 밸브의 축에 설치하였다.

데이터 획득은 NI사의 PXI (Peripheral Component Interconnect Extensions for Instrumentation)를 사용하였으며 PXI 샤시(PXI-1000B)에 제어기(NI 8174)와 DAQ 보드(NI 6025E) 그리고 I/O 연결단자를 연결하여 시스템을 구성하였다. 이 데이터 값은 Origin을 통해 수치를 시각화 하였다.



- 1. Air compressor
 - 2. Air reservoir
 - 3. Regulating valve
 - 4. Air surge tank
 - 5. Flowmeter
 - 6. Air surge tank
 - 7. Semi-induction pipe
 - 8. Resonator
 - 9. Pulse generator
 - 10. Rotary encoder
 - 11. D.C motor
 - 12. Motor controller
 - 13. Amplifier
 - 14. Terminal block
 - 15. DAQ(PXI) board
 - 16. Computer
- : Pressure transducers (no.1~no.4)

Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

Table 1 Dimension of intake system

Item	Diameter (mm)	Length & Volume
Surge tank(small)	350x400x500	70 ℓ
Surge tank(large)	600x700x500	210 ℓ
Semi-induction pipe	40	850 mm
Pulse generator	40	300 mm
Outlet pipe	40	780 mm
CR(Close Resonator)	-	0
SR(Small Resonator)	100	1177 cc
LR(Large Resonator)	100	2355 cc

Table 2 Requirement of experiment

Item	Method of experiment
Flow	30, 60, 90 Nm ³ /h
Pulse generator	128, 356, 600 rpm
Resonator volume	CR (0 cc), SR (1177 cc), LR (2355 cc)
Encoder	0.5 deg/pulse

3.2 실험방법

실험 조건은 공진기 체적변화, 펄스 발생기의 회전속도 및 유체의 유량의 증가를 변수로 삼아 그에 따른 맥동의 변화를 측정하였다. 유량 측정은 오리피스 유량계를 흡기관에 직렬로 삽입하여 그 평균을 기록하였으며 유량 조절은 감압밸브를 사용하였다.

실제 엔진에서 발생하는 정현파 형태의 압력파를 재현하기 위하여 로터리밸브를 회전시켰다. 회전속도는 300rpm, 356rpm 그리고 600rpm 까지 3단계로 나누어 실시하였다. 서지탱크, 흡기관 입구, 공진기 그리고 흡기관 출구(로터리 밸브 입구) 각 부분의 압력을 측정 하였다.

로터리 밸브의 위상 제어는 Rotary encoder를 장착하여 0.5° 마다 데이터를 수집한다. 데이터 수집은 LabVIEW를 이용해서 수행하였으며 오리진을 이용하여 그래프를 작성하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 유량변화에 따른 유동특성

흡기관 안에서는 피스톤의 운동과 밸브의 개폐에 의하여 파가 생성, 소멸되며 이러한 파의 상호작용을 통하여 파동이 발생한다. 이러한 파동은 공기 유동율에 영향을 주어 엔진의 체적효율에 중대한 영향을 미치게 되는데, 흡기밸브가 열렸을 때 어떠한 파의 모양이 도달하는지가 저속구간에서 체적효율의 변화를 주게 된다.

Fig. 4와 5는 각 펄스 발생기의 회전속도 128 rpm, 356 rpm에서의 유동특성이 양호한 경우의 유량 30 Nm³/h일 때의 공진기의 출구에서 흡기 압력변화를 나타내고 있다. LR(2355 cc), SR(1177 cc), CR은 각각 공진의 체적비가 2 : 1 : 0 을 의미한다. 유량이 작아 맥동은 작지만 피크의 위상은 밸브의 열림 기간 동안에 오고 있다. 따라서 급기는 안정적이다.

Fig. 4와 Fig. 6을 비교했을 때 같은 조건에서 유

량의 변화가 피크압력의 변화를 줄 수 있다. 여전히 최대피크 압력은 SR에서 오지만 LR과 CR에서 압력변화가 생겼음을 알 수 있다. 이는 엔진의 흡기유 증가할 때 저속구간에서 공진기 체적을 줄여줌으로써 체적효율을 증가 시킬 수 있음을 보여준다.

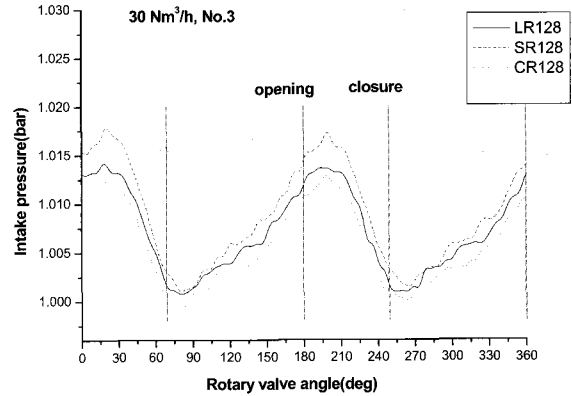


Fig. 4 Variation of measured intake pressure with various condition at 30Nm³/h-128rpm

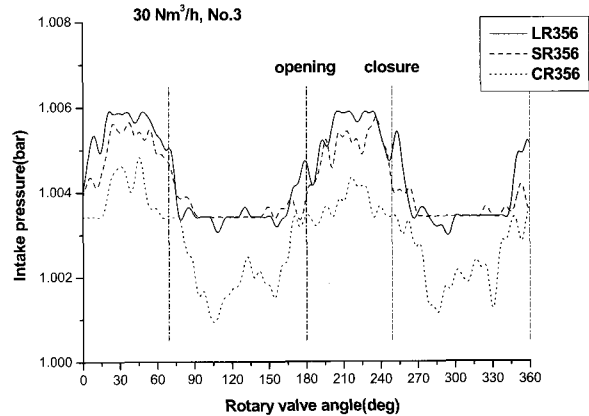


Fig. 5 Variation of measured intake pressure with various condition at 30Nm³/h-356rpm

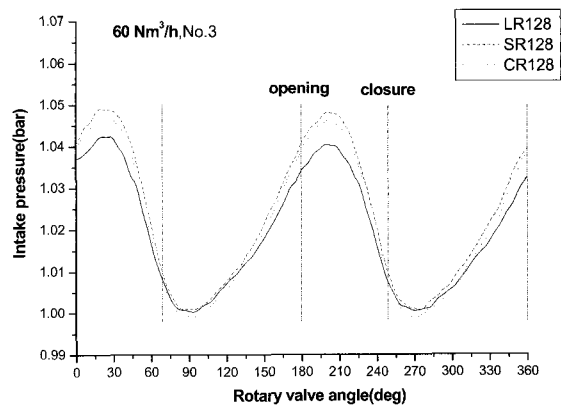
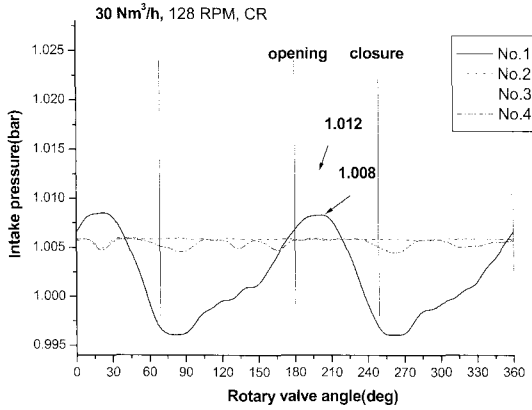


Fig. 6 Variation of measured intake pressure with various condition at 60Nm³/h-128rpm

4.2 공진기 개폐에 따른 흡기압력의 변화

Fig. 7과 8은 유량 30 Nm³/h 일 때, 공진기 개폐에 따른 흡기 압력을 비교한 것이다. 공진기를 열었을 때(1.016 bar)가 닫았을 때(1.012 bar)의 흡기압력 보다 높다. 또한 피크의 위상이 앞서 있음을 알 수 있다. 이는 공진기가 열리면서 파의 공진현상이 진폭의 성장에 기여했음을 보여준다.



- CR (Close Resonator)
- No.1(Inlet resonator),
- No.2(Inside resonator),
- No.3(Outlet resonator),
- No.4(Outlet pulse generator)

Fig. 7 Variation of intake pressure with resonator close opening condition

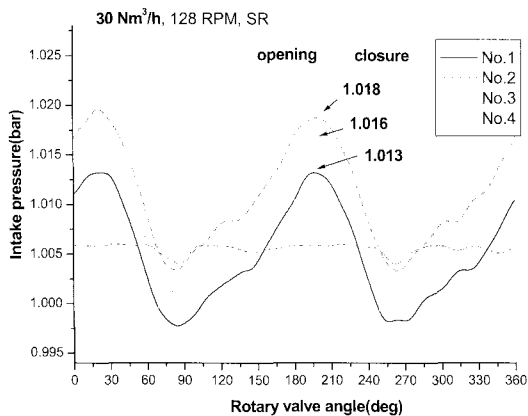


Fig. 8 Variation of intake pressure with resonator half opening condition

Fig. 9는 유량이 90 Nm³/h로 일정할 때 128rpm 인 상황에서의 공진기 개폐에 의한 상황을 나타내며 전체적으로 안정적인 급기를 보여준다. LR인 경우에 1.440 bar로 CR(1.083 bar), SR(1.076 bar)보다 압력이 가장 높았고, LR>CR>SR 순서로 압력이 형성됨을 알 수 있다. 공진기를 많이 열었을 때 압력

이 높아 이는 체적효율이 높아짐을 알 수 있다.

Fig. 9와는 달리 Fig. 10에서는 SR인 경우에 압력이 가장 높아짐을 알 수 있다. 600rpm에서는 약간의 빈압이 들어오면서 급기가 조금 불량해짐이 보여지고 SR>CR>LR 순으로 압력이 형성되어진다.

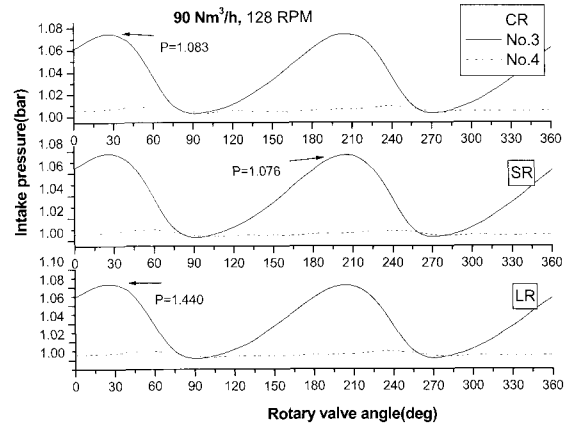
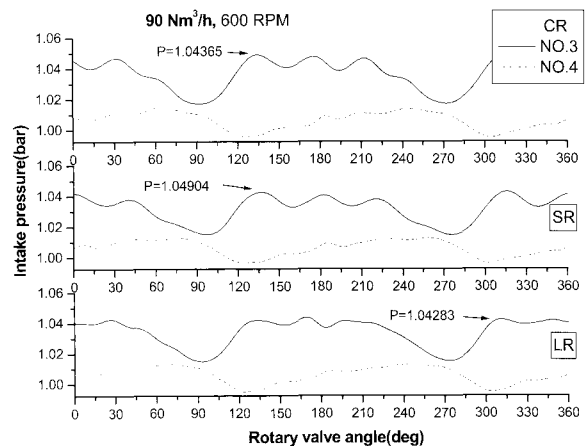


Fig. 9 Variation of measured intake pressure with various condition at 90Nm³/h-128rpm

5. 결 론

과급조건하의 디젤엔진 유사흡기시스템에서 가변 체적 헬름홀츠 공진기로 인한 흡기관 안의 급기유동특성을 조사하였다. 공진기가 급기성능에 미치는 영향에 관한 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.



- CR (Close Resonator)
- SR (Small Resonator)
- LR (Large Resonator)
- No.3(Outlet resonator),
- No.4(Outlet pulse generator)

Fig. 10 Variation of measured intake pressure with various condition at 90Nm³/h-600rpm

1) 공진기의 체적변화와 펄스발생기(pulse generator)의 회전속도 변화에 따라 흡기관내 파형과 최대압력이 변화함을 알 수 있었다.

2) 과급으로 인한 유량증가로 인하여 압력파의 위상과 진폭의 크기가 상호작용하여 복잡해짐을 알았다.

3) 펄스 발생기의 회전속도가 빨라지면서 공진기의 체적 변화가 위상에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4) 유량이 $60 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 인 경우, 펄스 발생기(pulse generator)의 회전속도 변화에 따라 공진기의 체적 제어와 개폐제어를 하면 급기에 유리한 파의 위상과 진폭제어가 가능함을 보여준다.

실제 엔진과 흡사한 유사흡기시스템으로의 실험에서도 실제 엔진처럼 공진기에 의한 위상의 변화가 생김을 알 수 있고, 일반적 엔진과 간접적으로 비교 할 수 있다는 것을 보여준다. 따라서 공진기의 개폐를 효율적으로 정밀제어를 한다면 연료 소비율 감소, 엔진 출력 증대 및 여기에 따르는 오염물 감소에 영향을 줄 것으로 기대된다.

6~32.

7. Broome, 1969, "Induction Ram, Part one, Wave Action Phenomena and the Design of Ram Intake Systems," Automobile Engineer, pp. 130~131.

8. 최재성, 전효중, 1997, "내연기관장의", 효성출판사, pp. 190~200.

참고 문헌

1. Desmond E. Winterbone and Richard J. Pearson, 2000, "Design Techniques for Engine Manifold, Waves Action Methods for IC Engines" Professional Engineering Publishing Limited, London and Bury St. Edmunds, UK, p.3.
2. 공태우, 2003, "자동차의 소음기 내부 형상에 따른 성능 및 수치 해석에 관한 연구", 경상대학교 대학원 정밀기계 공학과 공학석사 학위 논문.
3. 최석천, 2004, "Experimental and Computational Analysis of Single Cylinder 4-Stroke Motorcycle engine with a Various Geometry Exhaust Pipe", 경상대학교 대학원 공학석사 학위 논문.
4. 강희영, 2006, "가변 흡기 시스템에 의한 디젤기관의 체적효율 향상에 관한 연구", 부경대학교 대학원 제어기계 공학과 공학박사 학위 논문.
5. 강희영, 고대권, 안수길, 2005, "디젤기관의 흡기 맥동류가 체적효율에 미치는 영향", 한국동력기계 공학회지, 제9권, 제2호, pp. 19~25.
6. 강희영, 고대권, 안수길, 2005, "가변 헬름홀츠 공진기가 대기통 디젤기관의 체적효율에 미치는 영향", 한국동력기계공학회지, 제9권, 제3호, pp. 2