

스파크 점화기관의 연소실 형상에 따른 공진현상 해석에 관한 연구

박경석* · 장석형**

A Study on the Pressure Resonance with Combustion Chamber Geometry for a Spark Ignition Engine

Park Kyoung-Suk*, Jang Seok-Hyung**

Key Words: knock, pressure resonance, Draper's equation, combustion chamber

Abstract

Pressure resonance frequency that is caused in the combustion chamber can be interpreted to acoustic analysis. Until now the pressure resonance has been assumed and calculated to a disc type combustion chamber that neglected the combustion chamber height because the knock occurs near the TDC(top dead center). In this research FEM(fine element method) has been used to calculate the pressure resonance frequency inside the experimental engine combustion. The reduce error of the resonance frequency obtained by FEM has decreased about 50% compared to the calculation of Draper's equation. Due to the asymmetry in the shape of the combustion chamber that was neglected in Draper's equation we could find out that a new resonance frequency could be generated. To make the experimental results equal we could know that the speed of sound that satisfies Draper's equation was selected 13% higher than all the pent-roof type combustion considered.

기호설명

- f_r : Pressure resonance frequency
 C : Velocity of sound
 B : Cylinder bore diameter
 ρ_{mn} : Vibration mode constant
 ϕ : Scalar potential
 ω : Angular velocity
 x'_{pn} : Mode constant from Bessel function
 L : Combustion chamber height

1. 서론

노킹이 발생될 때에는 화염면 전방의 말단 가스 영역의 미연 혼합기는 압축되고 화염으로부터 열을 전달받아 극단적으로 많은 에너지를 가짐으

로써 자연 발화하기에 충분한 조건에 이른다 고 설명되고 있다. 이러한 말단가스가 급속하고도 완벽하게 착화되면 압력과 온도는 급격하게 상승한다. 이때 정상연소에 의한 기연영역과 급속한 연소로 인한 말단가스 영역은 불균일한 압력분포를 가지며 두 영역간에 압력평형을 이루는 과정에서 압력파는 연소실을 가로지른다. 이러한 충격파는 연소실 벽면에서 반사되면서 지속적인 파장을 나타낸다. 노킹은 일반적으로 압축 상사점 부근에서 발생하기 때문에 매우 작은 체적 하에서 발생한다. 이때 발생하는 압력의 공진 주파수는 연소실의 형상, 혼합기의 온도, 충전효율, 연소실에서의 음속 등에 따라 매우 넓은 영역에 분포한다. 밀폐된 실린더형 챔버 내부에서의 폭발에 의한 공진 주파수 f_r 은 Draper의 식(1)으로 표시할 수 있다.

$$f_r = \rho_{mn} \cdot \frac{C}{\pi B}$$

ρ_{mn} 은 무차원수이며 정수 m 과 n 은 반지름과 원주방향의 모드 정수이다.

Sawamoto⁽²⁾, Nakamura 등⁽³⁾은 연소실 전체를

* 경희대학교 기계·산업시스템공학부

** 경희대학교 대학원

동일한 가스 조건으로 보았을 때의 혼합기의 음속에 좀더 많은 영향을 받는다고 보고하였다. Dues 등⁽⁴⁾은 평균적인 기본 주파수의 변동은 주어진 모드의 운전에서 약 ± 400 Hz에 이르며, 연소실의 평균온도를 변화시키는 가장 큰 요인인 엔진 회전속도에 지배된다고 하였다. Kaneyasu 등⁽⁵⁾은 기관의 회전속도가 증가하면 노킹의 공진 주파수가 고주파 영역으로 이동한다고 보고하였으며, 음향학적 관점에서 디스크 형상의 체적에서 발생하는 공진 주파수는 수학적 해석에 의하여 규명되었다.⁽⁶⁾

노킹현상을 정량적으로 규명하기 위하여 고안된 가시화 엔진에 의해 노킹 발생 시 수반되는 많은 물리적, 화학적 특성들이 밝혀지고 있다. 연소실 내에서 발생하는 압력파의 주파수 영역 또한 정량적인 노킹의 분석이 가능한 가시화 실험 등을 통하여 연구되었다.⁽⁷⁾ 가시화 엔진의 특성상 연소현상의 촬영을 위하여 연소실 상부나 피스톤 상부에 Mirror나 Quartz window를 설치하여야 하며, 이에 따라 연소실 형상을 단순화해야 하기 때문에 대부분의 가시화 엔진의 연소실은 Disc Chamber나 Compact Chamber 형태를 취하고 있다.

상용 엔진의 경우 기관의 효율을 증대시키기 위하여 점차 복잡한 형상의 연소실이 채택되고 있다. Draper의 식을 바탕으로 한 노킹의 공진 주파수 예측은 이러한 연소실에서 각각의 모드별로 오차가 발생되고 있다. 이에 본 연구에서는 유한요소 해석을 통하여 연소실을 3차원 모델링하여 음향학적 해석을 수행함으로써 연소실에서 발생할 수 있는 공진 주파수를 보다 정확히 예측하고자 한다.

2. 연소실 내 공진주파수의 계산

연소실 내에서 발생하는 연소음과 노킹음은 혼합기에 전파되는 평면파의 파동 방정식을 통해 그 특성을 알 수 있다.

$$\nabla^2 \phi - \frac{1}{C^2} \frac{\nabla^2 \phi}{\nabla t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\omega^2}{C^2} \phi$$

유한한 길이의 실린더 형태의 체적하에서의 경계 조건으로 벽면에서의 속도성분을 0으로 하면

공진 주파수는 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$f_r = C \left\{ \left(\frac{x'_{pn}/\pi}{B} \right)^2 + \left(\frac{m}{2L} \right)^2 \right\}^{1/2}$$

x'_{pn} 은 Bessel 함수의 모드 정수이며 Table 1과 같다.

Table 1 Argument of the x'_{pn}
(Bessel function of the first kind)

p \ n	0	1	2	3	4
0	0	3.83	7.02	10.17	13.32
1	1.84	5.33	8.53	11.71	14.86
2	3.05	6.71	9.97	13.17	16.35
3	4.20	8.02	11.35	14.59	17.79
4	5.32	9.28	12.68	15.96	19.20

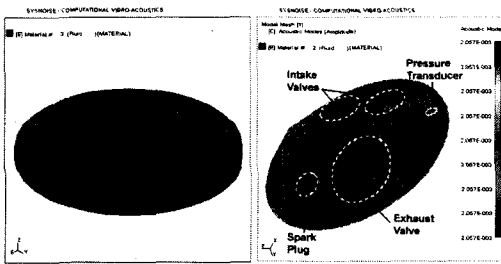
연소실 내에서 발생될 수 있는 공진 주파수를 구하기 위해서는 연소중인 가스의 상태를 파악하여야 한다. 노킹 발생 시 연소실 내 가스의 온도, 밀도 등 물리적 특징은 측정하기 어렵다. 또한 가스 온도는 연소실 내의 위치와 연소 진행과정 동안 수시로 변화하기 때문에 하나의 대표값으로 결정하기 불가능하다. 다만 정상연소 과정 동안 연소가스의 온도나 열전달 계수 등은 연소실내의 대류 열전달에 관한 선행연구자들의 연구에 의해 밝혀지고 있다. 이중 스파크 점화 기관에 대한 연구를 통해 신뢰성이 입증된 Woschni의 수정식⁽⁸⁾을 통해 연소가스 온도나 열전달 계수 등을 계산할 수 있다. 원종필⁽⁹⁾의 연구에 의하면 2000RPM에서 정상 연소 시 연소실 내 가스 온도는 크랭크 각 $360^\circ \sim 400^\circ$ 구간에서 약 1600~2500K의 넓은 온도 분포를 보이고 있다. 이러한 온도범위의 연소실에서 발생될 수 있는 음속은 약 800~1000 m/s 에 이른다.

연소실에서 발생하는 공진 주파수를 유한요소법에 의해 예측하기 위하여 연소실 내부의 형상을 모델로 작성한 후 상용 음향 해석 프로그램인 Sysnoise⁽¹⁰⁾를 이용하여 정상상태의 음향 모드를 구하였다. Draper의 식⁽¹⁾에 의해 계산되었던 공진 주파수를 확인하기 위하여 실험용 엔진의 연소실을 디스크 형태로 모델링하여 정상상태의 음향모드를 계산하였다. 이때 연소실의 높이는 실험용 엔진의 연소실 체적과 동일하게 유지하기 위하여 등가 높이를 계산하여 사용하였다.

Fig. 1의 (a)는 실험용 엔진과 동일한 체적을

가진 등가 디스크형 연소실이다. 모델은 768개의 엘리먼트와 1045개의 노드로 구성되어 있다. 실험용 엔진과 동일한 상태의 연소실 모델은 (b)에 표시하였다. 연소실은 노킹의 운전 조건과 가깝도록 상사점에 위치한 상태에서 모델링 되었다. 연소실 내부는 유체가 충전되어 있는 상태로 3차원 모델링 되었으며 2051개의 노드와 1536개의 엘리먼트로 구성되어 있으며 유동에 의한 조건은 고려하지 않았다.

연소 진행중인 가스 상태에 대한 정확한 물성과 경계조건 등은 알려져 있지 않다. 다만 공진 모드에 크게 영향을 미치는 연소 온도, 음속과 작동유체의 밀도는 선행 연구자들의 연구 결과⁽⁹⁾로부터 신뢰성 있는 범위 내에서 추출하여 사용하였다. Table 2는 실험에 사용된 경계조건을 표시한 것이다. 연소실 내에서의 음향학적 모드는 노킹으로 인한 관심 주파수인 20kHz 부근까지 관찰하기 위하여 15차까지 계산하였다.



(a) Disc type (b) Pent-roof type

Fig 1. FEM Model of the Combustion Chamber

Table 2 Boundary conditions for the analysis

Material property	Value	Data from
Fluid Temperature	2300 K	Reference(9)
	1800 K	
Speed of Sound	960 m/s	Reference(11)
	850 m/s	
Pressure in the cavity	3367 kPa	Experiment

3. 결과 및 고찰

Table 3은 Draper의 식과 유한요소 해석을 통해 얻어진 실험용 엔진의 연소실 내 공진 주파수이다. 각각의 주파수는 Table 2의 경계조건에 따라 연소실의 형상을 등가의 디스크형과 펜트루프

(pent-roof)형으로 하였을 때 공진 주파수를 나타낸 것이며 실험 결과와 비교하였다. Draper의 식에 의한 연소실 내의 공진 주파수는 실험 결과와 -8.6~2.7%의 오차 범위 속에서 일치하고 있다. 이때 사용된 음속은 실험결과 얻어진 제 1 공진모드를 역으로 계산하여 얻어진 960 m/s를 사용하였다.

등가 디스크형 연소실을 모델로 사용한 결과는 Draper의 식에 의한 공진 주파수 보다 약 100~600Hz 높게 나타났으며 고주파 영역으로 갈수록 그 차이는 커지고 있다. 이는 저차 모드에서는 높이 방향의 모드 변화가 관찰되지 않으나 고차 모드로 갈수록 높이 방향의 모드 변화가 관찰되면서 공진 주파수의 차이가 커지는 것으로 보여진다. Draper의 식에 의한 값보다 유한요소 해석에 의한 주파수가 높게 나타나는 것은 높이 방향을 고려하지 않은 Draper의 식의 오차로 판단할 수 있다. 등가 디스크형 연소실에서의 공진 주파수는 실험결과와 -6.9~5.0%의 오차를 보이고 있으며 이는 Draper의 식에 의한 결과의 오차범위와 동일한 변동 범위를 가지고 있다.

본 연구에 사용한 실험용 엔진의 연소실 형상을 3차원 모델링 한 펜트루프(pent-roof)형 연소실에서의 유한요소 해석 결과는 Draper의 식에 의한 것과 동일한 경계조건으로 음속을 960 m/s로 하면 실험에 의한 결과보다 모든 공진 주파수가 약 15% 이상 높게 나타난다. 따라서 실제 연소실에 가깝게 모델링한 후 해석을 수행할 경우 음속은 Draper의 식에 사용된 것 보다 적은 값을 추출하여 사용하여야 한다.

따라서 경계조건 중 음속은 앞서 살펴본 대로 연소실 내에서 물리적 조건을 고려하였을 때 예측 가능한 범위인 800~1000 m/s 중의 대표 값을 추출하여 사용하였다. 이에 따라 선정된 음속은 850 m/s이며 그에 따른 유한요소 해석 결과는 Table 3에 표시하였다. 공진 주파수는 실험에 의한 결과와 -0.7%~4.6%의 오차 범위에서 일치하고 있다. 이는 Draper의 식에 의한 결과나 등가 디스크형 연소실에서의 유한요소 해석 결과의 오차범위 보다 약 50% 감소한 것으로 매우 신뢰도 높은 값이다. 펜트루프(pent-roof)형 연소실의 유한요소 해석 결과에 사용된 음속을 디스크형 연소실에 적용하여 계산할 경우 공진 주파수

는 실험에 의한 결과보다 약 12~20% 낮다. 이렇게 구해진 음속 850 m/s 는 연소실의 유동 현상을 고려하지 않은 것이므로 이를 고려하면 실제 연소실내 음속은 더 낮아질 것으로 예측할 수 있다. 따라서 향후 연소실내 유동을 고려하여 유체 요소가 가지는 속도성분 등을 고려하면 보다 정확한 연소실내 음속을 예측할 수 있을 것이다. Fig. 2는 연소실내 공진 모드를 구하기 위한 각각의 방법에 대한 오차를 실험에 의한 결과와 비교한 것이다.

Table 3 Acoustic modes in the combustion chamber

C mode	Resonance Frequency (Hz)					
	Disc type (by FEM)		Draper's equation	Pent-roof type (by FEM)		Experiment
	850	960	960	850	960	?
1/0	6672	7614	7497	7644	8633	7600
1/0	6672	7614		9433	10654	
2/0	11097	12663	12427	13502	15250	13600
2/0	11116	12685		13694	15466	
0/1	13989	15964	15605	15624	17646	15200
3/0	15368	17538	17112	18210	20566	18200
3/0	15368	17538		18475	20866	
1/1	19559	22321	21291	20750	23435	
1/1	19559	22321				
4/0	19601	22368	21676	22822	25776	21800
4/0	19649	22423		23056	26040	

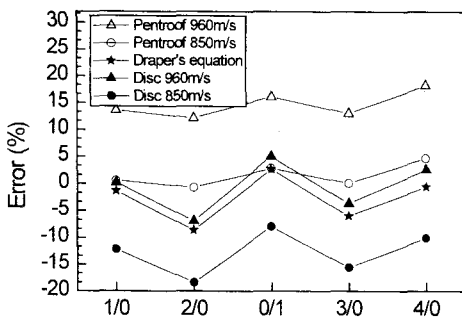


Fig. 2 Calculation error correlation between Draper's equation and FEM analysis

Fig. 3은 음속을 960 m/s 로 하였을 때 등가

디스크형 연소실의 1/0 공진 모드 모양으로 주파수는 7614Hz이다. 공진 주파수는 Draper의 식에 의한 공진 주파수와 모든 모드에서 약 2%의 오차를 가지고 있다. Fig. 4는 2/0 모드 모양으로 원주 방향으로의 변화보다 반지름 방향의 변화에 의해 모드 모양이 결정되며 공진 주파수는 12663Hz이다.

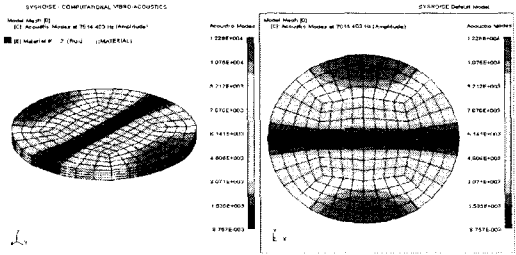


Fig. 3 Acoustic mode shape in the equivalent combustion chamber (1/0 mode, 7614Hz)

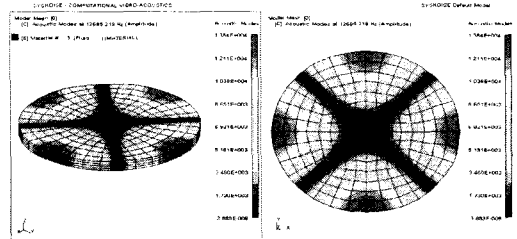


Fig. 4 Acoustic mode shape in the equivalent combustion chamber (2/0 mode, 12663Hz)

Draper의 식에 의한 계산 결과와 등가 디스크형 연소실에서의 유한요소 해석 결과 1/0모드는 모두 원통형 구조의 모드이므로 공진 주파수는 하나이다. 그러나 펜트루프(pent-roof)형 연소실의 경우 또 하나의 1/0모드가 관찰되고 있다. Acoustic mode shape은 동일하나 그 방향이 서로 90°를 이루고 있으며 연소실의 형상에 의해 동일한 모드에서 두 가지의 공진 주파수를 가질 수 있음을 보이고 있다. 이는 연소실 형상의 비대칭성 때문에 발생하는 것으로 보이나 엔진 가동 실험 결과 연소실내의 압력 변동 주파수 중 이에 해당하는 9433Hz영역에서는 공진 주파수가 관측되지 않았다. Fig. 5와 Fig. 6은 1/0 모드의 형상을 표시하였으며 공진 주파수는 각각 7644Hz, 9433Hz 이다. 노킹은 연소실의 구조, 스파크 플러그의 위치 및 흡입유동의 방향을 고려할 때 화염 진행거리가 가장 먼 위치인 압력변환기 장착 위치 부근에서 주로 발생될 것으로 예측된다. 따

라서 노킹 발생 시 정상연소화염과 자발화 화염은 Fig. 5와 같이 좌우 대칭 형태로 나누어질 것으로 예상할 수 있으며 공진 주파수도 이러한 형태의 모드 모양인 7600Hz 부근에서 관찰되는 것으로 사료된다.

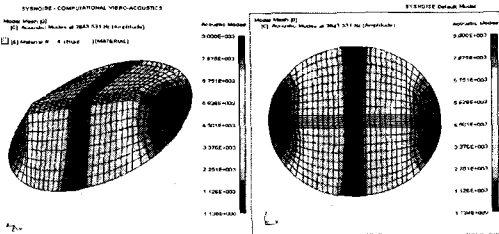


Fig. 5 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (1/0 mode, 7644Hz)

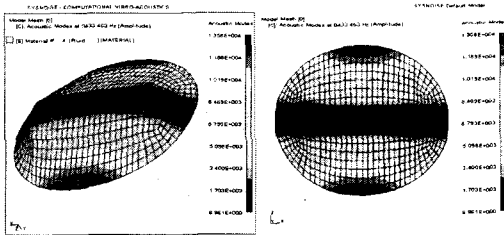
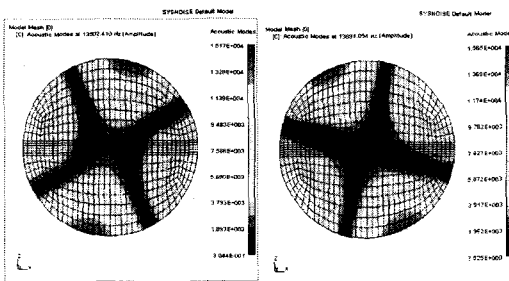


Fig. 6 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (1/0 mode, 9433Hz)

2/0 모드의 경우도 1/0 모드의 경우와 마찬가지로 연소실 형상에 따라 서로 90° 회전되어 있는 형태로 모드가 존재하지만 이 경우 회전 후에도 서로 간의 형상이 유사하기 때문에 공진 주파수는 각각 13502Hz와 13694Hz로 매우 근접해 있다. Fig. 7은 두 가지의 2/0 모드 형상이다.



(a) 13502Hz (b) 13694Hz
Fig. 7 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (2/0 mode)

유한요소 해석 결과 공진 주파수가 15624Hz인 0/1모드는 엔진 실험 결과 노킹의 정상 연소상태에서는 거의 관찰되지 않았으며 노킹의 강도가 매우 큰 일부 사이클에서만 관찰되었다. Fig. 8은 0/1모드의 Acoustic mode이다.

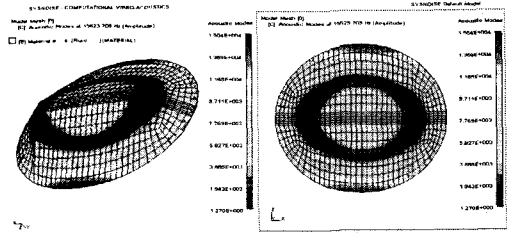
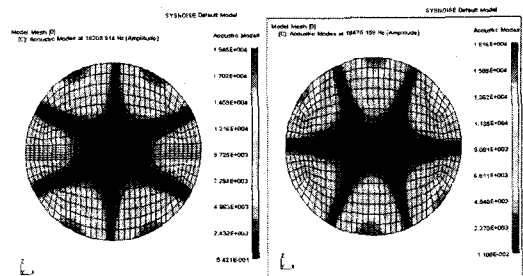


Fig. 8 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (0/1 mode, 15624Hz)

3/0 모드는 앞의 1/0, 2/0의 유한요소 해석 결과와 마찬가지로 동일한 모드에서 두 가지의 공진 주파수를 가지고 있다. 그 중 실험결과는 1/0 모드 중 연소실을 Z 축과 평행한 방향으로 나누는 모드에 가까운 공진주파수가 관측되었는바 3/0 모드 중 연소실을 동일한 방향으로 나누고 있는 Fig. 9의 (a)를 해당 주파수로 판정하였다. Fig. 9는 두개의 3/0모드로 공진 주파수는 각각 18210 Hz, 18475Hz이다.

실험에서 관찰된 21800Hz의 공진 주파수에 근접한 모드는 Fig. 10의 1/1모드와 Fig. 11의 4/0모드가 있으며 이중 4/0모드 일 것으로 여겨진다. 이는 0/1모드인 15624Hz 영역의 공진 주파수가 일부 노킹이 발생된 연소 사이클에서만 관찰된 것처럼 연소실내의 Acoustic mode가 주로 반지름 방향으로 나누어지고 원주 방향으로는 나누어지기 어렵기 때문이다.



(a) 18210Hz (b) 18475Hz
Fig. 9 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (3/0 mode)

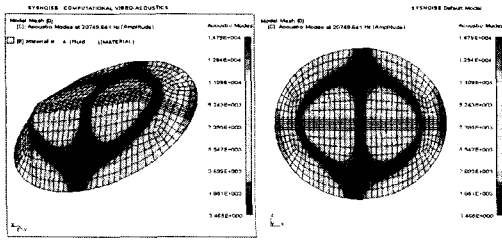


Fig. 10 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (1/1 mode, 20750Hz)

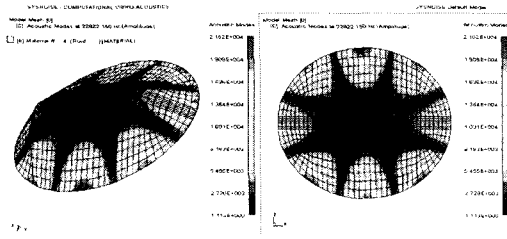


Fig. 11 Acoustic mode shape in the pent-roof combustion chamber (4/0 mode, 22822Hz)

4. 결론

본 연구에서는 연소실 내에서 발생할 수 있는 공진 모드를 유한요소 해석에 의하여 구함으로써 실험용 엔진에서 발생될 수 있는 모든 영역의 공진 주파수를 예측하고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실험 결과와 일치하기 위해 Draper의 식을 만족하는 음속은 펜트루프(pent-roof)형의 연소실 형상을 모두 고려할 때의 음속보다 약 13% 높게 선택된다. 따라서 이러한 형태의 연소실내 음속은 Draper의 식을 만족하는 값보다 작을 것으로 판단된다.

(2) 유한요소법으로 구한 연소실내 공진 주파수는 Draper의 식에 의한 것보다 더욱 정확하게 실험 결과와 일치하고 있는 것을 알 수 있었다.

(3) Draper의 식에 의해서는 나타나지 않았던 공진 주파수들이 유한요소법에 의한 해석결과 구해졌으며 이는 연소실의 비 대칭성 때문에 발생한 것이다. 특히 1/0모드의 경우 매우 다른 주파수를 보이고 있으며 고주파 영역에서는 비대칭의 형상 차이가 작아짐에 따라 공진 주파수의 차이가 작아지고 있다.

(4) 모드 모양 중 동심원의 형태로 나누어진

0/1와 1/1 모드가 노킹의 관심 주파수 범위에 존재하고 있으나 0/1 모드가 실험 결과 일부 사이클에서만 관찰되었다. 따라서 실험에 의해 측정된 공진 주파수는 유사한 주파수를 가지는 4/0모드와 1/1 모드 중 4/0 모드에 의한 주파수로 예측되며 1/1 모드는 거의 발생하지 않을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) C. S. Draper, 1938, "Pressure Waves Accompanying Detonation in the Internal Combustion Engine", Journal of The Aeronautical Sciences, Vol. 5, No. 6
- (2) K. Sawamoto, Y. Kawamura, T. Kita, and K. Matsushita, 1987, "Individual Cylinder Knock Control By Detecting Cylinder Pressure", SAE 871911
- (3) N. Nakamura, E. Ohno, M. Kanamaru, and T. Funayama, 1987, "Detection of Higher Frequency Vibration to Improve Knock Controllability", SAE 871912
- (4) S. M. Dues, J. M. Adams, and G. A. Shinkle, 1990, "Combustion Knock Sensing : Sensor Selection and Application Issues", SAE 900488
- (5) M. Kaneyasu, N. Kurihara, K. Katogi, and H. Tokuda, 1992, "Engine Knock Detection Using Multi-Spectrum Method", SAE 920702
- (6) P.M. Morse, and K.U. Ingard, 1978, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill, New York, pp.511
- (7) 高木 靖雄, 伊東 輝行, 飯島 有, 1986, "火花點火機關のサイクルごとの自己發火による燃焼率特性とノッキング強度について", 日本機械學會論文集 (B編), pp. 3068~3074
- (8) G. Woschni and J. Fieger, 1982, "Experimental Investigation of the Heat Transfer at Normal and Knocking Combustion in Spark Ignition Engines", MTZ, Vol. 43, pp.63~67
- (9) 원종필, 1999, "자동차용 고집적 열교환기의 열유동 해석", 경희대학교 박사학위 논문
- (10) Numerical Technologies NV, 1997, *SYSNOISE Rev 5.3 User's Manual*, Leuven Measurement Systems
- (11) 一宮亮一, 1992, *機械系の音響工学*, コロナ社