

고출력 엔진에서 연소실 내의 노킹음에 의한 공진현상 분석

Analysis of Cavity Resonances caused by Knocking in Chamber of High Power Engine

이두곤*, 장석형**, 이종호*, 박경석**, 전계석*

(Du-Gon Lee*, Seok-Hyung Jang**, Chong-Ho Yi*, Kyung-Suk Park**, Kye-Suk Jun*)

요 약

고출력 가솔린 엔진에서 연소실 내의 급격한 압력 변화에 의해 노킹음이 발생하는데 이로 인하여 공진현상이 일어난다. 일반적으로 이러한 공진음은 5KHz 이상에서 발생되고 이 현상에 대한 분석을 고출력 가솔린 엔진의 노킹 제어 시스템을 설계하는데 매우 중요하다. 본 논문에서는 고출력으로 설계된 엔진에서 사용되는 노킹 제어 시스템을 설계하기 위해 연소실에서 발생하는 노킹현상을 이론적으로 분석하여 노킹음의 모노톤 장진 주파수를 예측하였다. 또한 스쿠프 약과 엔진과 독일 보슈사의 비공진형 노킹센서를 사용하여 실험을 수행하였고, 그 결과 이론과 실험이 잘 일치함을 알 수 있었다.

ABSTRACT

Cavity resonances are caused by combustion such as the rapid rate of pressure rise that occurs from knock in high power gasoline engines. These resonances generally occur at frequencies greater than 5KHz. Analysis of these resonances is important for knock control system design in high power gasoline engines. In this paper, in order to design knock control system for the high power gasoline engine, knock phenomena that occur in chamber were analyzed theoretically and resonance frequencies of knock signals were predicted. Also, experiments were performed using Scoupe x-engine and non-resonance type knock sensor of Bosch co. in Germany. In the result, good agreement was obtained between theoretical prediction and experimental observation.

I. 서 론

전기에 의한 노킹음 발생에 대한 연구에 대해서는 고출력화에 관한 연구와 개발이 급속히 발전되고 있다. 일반적으로 엔진에서 발생하는 유향에너지는 피

스톤의 운동으로 인한 수 백Hz 이하의 에너지이고 엔진구조는 이러한 저주파 에너지에 대해 매우 적은 질량 중량 중심을 가지고 있어 이러한 에너지는 소음으로 간주되지만 고출력 엔진에서는 연소실 내의 급격한 압력상승으로 인하여 수 KHz 이상의 노킹음이 발생된다. 가솔린 엔진에서의 노킹현상은 점화 지점에서 발생한 화염이 연소실 내로 전파될때 말화되지 않은 말단의 혼합기가 고온, 고압으로 인하여 자연폭발

* 경북대학교 기계공학과

** 상희대학교 기계공학과

접수일자: 1992. 5. 24

하여 압력이 급격히 상승하는 현상이다^{1,4}. 이러한 노킹음은 기관의 열손실을 증가시키고 엔진에 균열을 발생시켜 엔진의 성능을 저하시킨다^{1,4}. 따라서 고출력 엔진은 노킹음을 검출하고 자동제어하여 노킹현상이 발생되지 않고 정상연소를 유지시킬 수 있는 최적의 조건으로 구동시켜야 한다^{1,7,8}. 본 논문은 고출력 엔진과 노킹 제어 시스템 연구의 한 분야로서 실린더 연소실 내에서 노킹에 의한 공진현상을 원통형 좌표계에서 음향파의 파동 방정식으로 모델링하고 파동 방정식의 해를 유도함으로써 특정한 엔진의 노킹모드를 예측할 수 있는 일반적인 이론을 제시하였다^{1,2,3}. 실험에서는 현대 자동차의 스쿠프 알파 엔진과 독일 보슈사의 비공진형 노킹센서를 이용하여 시간영역과 주파수 영역에서 노킹음을 측정하고 이론과 비교, 분석하였다.

II. 실린더 내에서 노킹에 의한 공진현상

실린더 구조는 그림 1.과 같이 원통형으로 놓고 실린더 내의 혼합기는 탄성 상수를 C_{11} , 밀도를 ρ 를 갖고 실린더 내의 음장은 주파수 ω 를 갖는다고 가정한다.

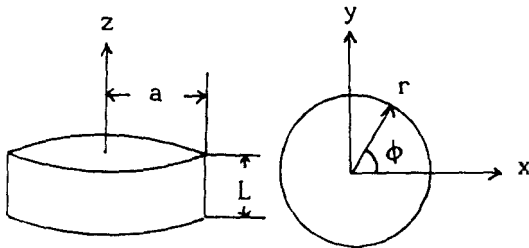


Fig. 1. Structure of cylinder

실린더내의 혼합기에는 횡파가 존재하지 않으므로 포텐셜 이론으로부터 음장에서 종파성분만 고려하면 식 1.과 같이 실린더 내의 음장을 스칼라 파동 방정식으로 모델링할 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi - (1/V_1)^2 \frac{d^2 \Phi}{dt^2} = 0 \tag{1}$$

$$\mathbf{V} = \nabla \Phi \tag{2}$$

여기서

Φ : 스칼라 포텐셜 (scalar potential)

$$V_1 = (C_{11} / \rho)^{1/2} \tag{3}$$

\mathbf{V} : 입자속도 (particle velocity)

위의 스칼라 파동방정식을 원통형 좌표계에서 베셀함수를 이용하여 Φ 에 대해 풀어보면 식 4.와 같다.

$$\Phi(r, \phi, z) = [A_1 J_p(K_{11}r) + A_2 N_p(K_{11}r)] [B_1 \sin(P\phi) + B_2 \cos(P\phi)] \cdot C \cdot \exp(\pm j\beta z) \tag{4}$$

여기서

$$K_{11}^2 + \beta^2 = (\omega / V_1)^2 \tag{5}$$

J_p : 제1종 베셀 함수

N_p : 제2종 베셀 함수

A_1, A_2, B_1, B_2, C : 임의의 진폭값

$r = 0$ 인 지점에서 Φ 값이 유한하다는 가정으로 제2종 베셀함수를 무시하고 파동 방정식의 해를 구하면 아래와 같다.

$$v_r = A \cdot K_{11} \cdot J'_p(K_{11}r) \cdot \cos(P\phi) \cdot \exp(\pm j\beta z) \tag{6}$$

$$v_\phi = -A \cdot P / r \cdot J_p(K_{11}r) \cdot \sin(P\phi) \cdot \exp(\pm j\beta z) \tag{7}$$

$$v_z = \pm j\beta z \cdot A \cdot J_p(K_{11}r) \cdot \cos(P\phi) \cdot \exp(\pm j\beta z) \tag{8}$$

아래와 같은 경계치 조건을 위 식에 적용하여 상수를 구하고 식 5.를 이용하여 실린더 내의 음파의 공진 주파수를 식 12.와 같이 유도할 수 있다.

$$\begin{cases} r = a \text{에서 } v_r = 0 \\ z = 0, L \text{에서 } v_z = 0 \end{cases}$$

$r = a$ 에서 $J'_p(K_{11}a) = 0$ 이므로 J'_p 가 zero인 $K_{11}a$ 를 X'_{pn} 이라 놓으면

$$K_{11} = X'_{pn} / a \tag{9}$$

X'_{pn} : 제1종 베셀함수의 미분값이 영이 되는 X 축 값

$z = 0, L$ 에서

$$\beta = m\pi / L, \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots \tag{10}$$

식(5) $K_0^2 + \beta^2 = (\omega / V_1)^2$ 에서

$$\omega^2 = (V_1)^2 \{ (X'_{pn} / a)^2 + (m\pi / L)^2 \} \quad (11)$$

$$f = V_1 \{ (X'_{pn} / 2a\pi)^2 + (m / 2L)^2 \}^{1/2} \quad (12)$$

실린더 내에서 노킹은 피스톤의 위치가 상사점 근처일 때 발생되고 실린더의 축방향 길이는 직경보다 매우 작으므로 z축 방향의 성분을 무시하면 노킹음의 공진 주파수는 식 13.과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{pn} = V_1 \cdot X'_{pn} / B\pi \quad (13)$$

여기서

B : 실린더의 직경

그러므로, 노킹이 발생될 때 연소실 내의 유장성분은 아래와 같다.

$$v_r = A \cdot X'_{pn} / a \cdot J_p (X'_{pn} r) \cdot \cos(P\phi) \cdot \exp(\pm j\beta z) \quad (14)$$

$$v_\theta = -A \cdot P / r \cdot J_p (X'_{pn} r) \cdot \sin(P\phi) \cdot \exp(\pm j\beta z) \quad (15)$$

아래 표 1.은 노킹음의 주요한 공진 모드를 나타낸 것이다.

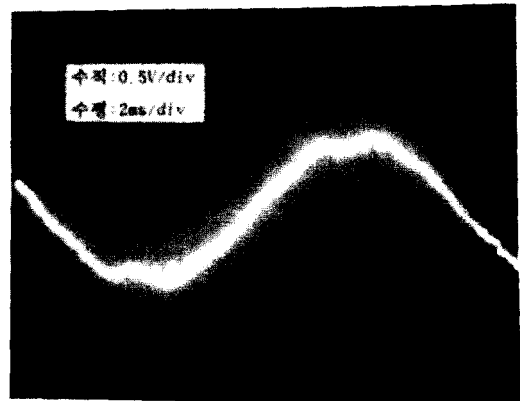
table 1 Resonance mode

X'_{pn} 값	압력분포
X'_{11} 모드 : 1.841	
X'_{21} 모드 : 3.054	
X'_{02} 모드 : 3.832	

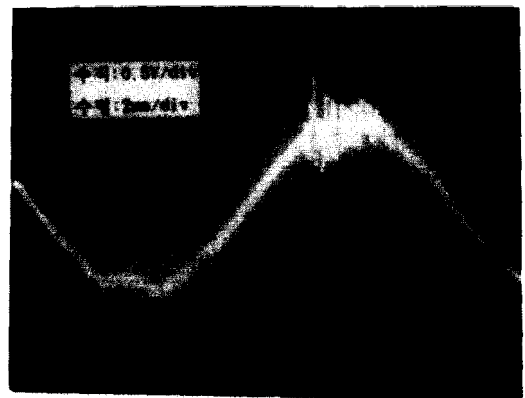
III. 실험 및 고찰

본 논문의 실험을 위해 직경이 75.5mm, 연료비가

14.7/1이고 압축비가 10/1인 현대 자동차의 스쿠프 α -엔진을 사용하였고, 노킹센서는 독일 보슈사의 비공진형 노킹센서를 이용하여 엔진 불력에 부착하였다. 사진 1.은 노킹이 발생하지 않은 정상 상태에서 노킹 센서로 검출한 출력신호를 오실로스코프로 관찰한 것인데 이때 엔진의 회전수는 1074 rpm이고, 최대 부하에 대한 64%의 부하(load)를 걸었다. 사진 2.는 인위적으로 점화진각을 조정하여 혼합기의 압력이 노킹이 생기는 임계압력까지 올려서 노킹을 발생시킨 경우의 노킹센서로 검출한 신호이다. 이때 엔진 회전수는 1019 rpm이고, 최대부하의 57.5%를 걸었다. 두사진을 비교해보면 시간영역에서 사진 2.와 같이 신호가 발생된 것을 관찰할 수 있는데 이것이 노킹음으로 판단된다.



(Photo. 1) Output of knock sensor (non-knock)



(Photo. 2) Output of knock sensor (knock)

그림 2는 노킹이 발생하지 않은 경우 센서의 출력을 HP8560A 스펙트럼 분석기로 500Hz에서 25kHz까지

지 관찰할 것이다. 그림 3.은 노킹 발생시 스펙트럼의 특성이다. 그림 3.에서 나타난 바와 같이 첫번째 공진 모드는 6.63KHz에서 발생되고 두번째는 9.48KHz, 세번째는 12.91KHz, 네번째는 16.18KHz에서 발생되는 것을 관찰할 수 있다. 표 2.은 이론값과 실험값을 비교한 것이다. 식 13.에서 이론값을 구할때 혼합기의 종파속도는 밀도와 탄성상수에 의해 결정되는데 혼합기의 밀도와 탄성상수는 각 행정마다 재연성이 없으므로 종파속도의 정확한 이론치는 알 수 없다. 그러므로 첫번째 공진 주파수를 이용하여 식 13.에 대입하여 종파속도를 계산한 후 이것을 이용하여 모드별 공진 주파수를 계산하였다. 그리고 이론값과 유사한 실험치를 각각의 모드로 추정할 수 있었다.

Table 2. The theoretical values and the experiment results of the resonance frequencies

mode	이론치(KHz)	실험치(KHz)	오차(%)
1,1	*	6.63	*
2,1	11.0	9.48	13.8
0,2	13.8	12.91	6.4
3,1	15.13	16.18	7

IV. 결 론

본 논문에서는 실린더 내의 노킹에 의한 공진현상을 이론적으로 분석하여 노킹음의 모드별 공진주파수를 예측한 후 실험을 수행하여 이론값과 비교, 분석하였다. 노킹음의 공진 주파수는 실린더의 직경과 실린더 내 혼합기의 음파속도의 함수로 나타낼 수 있는 것을 알 수 있었으며 측정된 공진 주파수는 약 10% 오차 범위내에서 이론값과 잘 일치하였다.

본 논문의 결과는 고출력 엔진과 노킹 제어 시스템을 국산화하는 연구분야에서 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

V.참 고 문 헌

1. B.A.Auld "Acoustic Fields and Waves in Solids" vol.2, p. 63-73, p.104-114, A Wiley-Interscience Publication, 1973
2. P.M.Morse and K.U.Ingard "Theoretical Acoustics" McGraw-Hill, New York p.511 1978
3. L.E.Kinsler, A.R.Frey, A.B.Coppens, J.V.Sanders "Fundamentals of Acoustics" John Wiley & Sons p.96 1982
4. 金熙喆 俞炳澈, "內燃機關" 文運堂 p.138-162
5. R.Hickling, F.H.K.Chen, D.A.Feldmaier, and S.Morel "Cavity Resonances in engine combustion chambers and some applications" J.Acoust. Soc.Am. 73(4), April 1983
6. R.Hickling, D.A.Feldmaier, and S.H.Sung "Knock-induced cavity resonances in open chamber diesel engines" J.Acoust. Soc.Am. 65(6), June 1979
7. 中村徳彦, 大野榮嗣, 金丸昌宣, 丹山友幸 "高沈 ノッキング 周波數檢出型 ノックアウトコントロールシステムの開發" 自動車技術會論文集 p.54 1986
8. 山下修三 "ノックセフサ" NGK Spark Plug Co. Ltd.
9. Mark Serridge, BSc and Torben R. Licht, MSc. "Piezoelectric Accelerometers and Vibration Preamplifiers" Brüel & Kjaer 1987

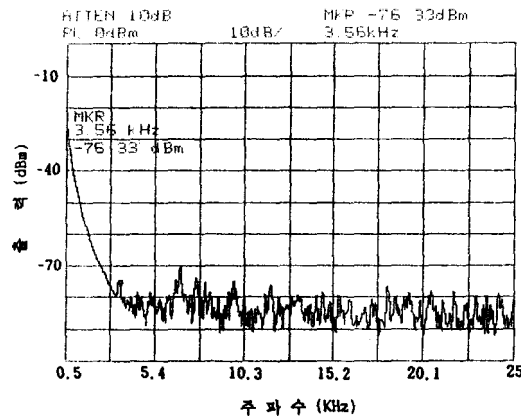


Fig. 2. Spectrum of non-knock signal

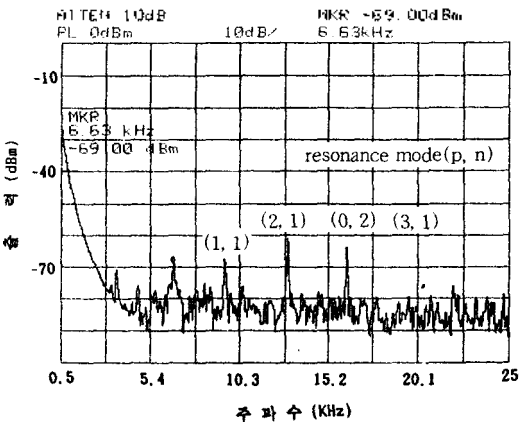
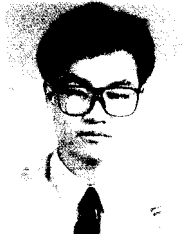


Fig. 3. Spectrum of knock signal

본 연구는 공화금속(주) 연구소의 일부지원에 의하여 이루어졌으며 관계제위께 감사드립니다.

▲이 두 근



1967년 11월 3일생
1987년 3월~1991년 2월 : 경희대학교
공과대학 전자공학과
(공학사)
1991년 3월~현재 : 경희대학교 대학원
전자공학과(석사과정)

▲장 석 형

1965년 10월 8일생
1984년 3월~1988년 2월 : 경희대학교 공과대학(공학사)
1991년 3월~현재 : 경희대학교 대학원 기계공학과(석사과정)

▲이 종 호



1965년 10월 8일생
1984년 3월~1988년 2월 : 경희대학교
공과대학 전자공학과
(공학사)
1988년 3월~1990년 2월 : 경희대학교
대학원 전자공학과(공학석사)
1990년 2월~1991년 2월 : 한국전
자통신연구소 연구원
1991년 3월~현재 : 경희대학교 대학원 전자공학과(박사과정)

▲박 경 석



1947년 4월 23일생
1972년 2월 : 인하대학교 기계공
학과 졸업(공학사)
1975년 2월 : 인하대학교 대학원
기계공학과 졸업(공
학석사)
1978년 2월 : 인하대학교 대학원
기계공학과 졸업(공학박사)
1983년 11월~1985년 2월 : 일본 게이오대학 방문교수
1978년 3월~현재 : 경희대학교 공과대학 기계공학과
교수

▲전 계 석 : 9권2호 참조
현 경희대학교 교수