

LPG 인젝터의 소음원 규명 및 소음저감 대책

김원진*, 박종현*, 김성대**, 이병호***

Noise Source Identification and Countermeasure for the Noise of LPG Injector

Won Jin Kim*, Chong Hyun Park*, Sung Dae Kim** and Byung Ho Lee***

ABSTRACT

This work focuses on finding out the noise source and the method of reducing the noise level of LPG(liquefied petroleum gas) fuel injector. The noise of LPG injector in operating condition is due to the impact between valve and valve seat. This study shows that if the revolution of engine is increased, the noise of LPG injector will be more serious but it is not nearly affected by the increment of fuel pressure. The source and transmission paths of noise are identified through the analysis of noise generation mechanism and noise spectrum. The sound absorbing material is tested to verify its efficiency of sound absorption for the LPG injector. The effect of noise reduction of absorbing material is remarkable when the engine speed is high. Consequently two methods of reducing the noise level are suggested from the identified results. The one is to equip the absorbing material on the outer side of injector and the other is to coat with a soft material or equip a soft ring on the surface of impact.

Key Words : LPG fuel injector(LPG 연료 인젝터), Impact noise(충돌소음), Noise source identification(소음원 규명), Noise reduction(소음 저감)

기호설명

α_0 = absorption coefficient
 $\gamma_0(f)$ = reflection coefficient
 $S_{AA}(f)$ = incidence autopower spectrum
 $S_{BB}(f)$ = reflection autopower spectrum

1. 서론

엔진 연료공급 장치의 부품인 인젝터 소음도 자동차 내부소음에 부분적으로 기여한다. 일반 가솔린 차량에서는 탑승자가 주의를 기울여야 느낄 수 있을 정도로 인젝터 소음이 미미하여 거의 연구가 없었으나, 최근들어 저공해 대체 에너지인 LPG (liquefied petroleum gas)를 연료를 사용하는 차량의 수요가 증가됨에 따라 인젝터 소음이

*** 2001년 9월 27일 접수

* 계명대학교 기계·자동차공학부

** 한국과학기술원 기계공학과 대학원

*** (주)창원기화기 기술연구소

상대적으로 큰 LPG 연료 인젝터의 소음 저감에 대한 관심이 높아지고 있는 상태이다.

기존 LPG 차량에서는 믹서(mixer)와 기화기(vaporizer)를 사용하는 믹서 연료 시스템을 사용하고 있어 연비와 출력이 상대적으로 낮은 단점을 가지고 있었다⁽¹⁾. 이러한 단점을 보완하기 위해 개발된 액체 연료 분사 시스템은 인젝터를 사용하여 간접 분사하는 방식으로 높은 연비와 출력을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 액체 연료 분사 시스템은 일반 가솔린 인젝터의 구동압력보다 높기 때문에 인젝터 소음이 크게 나타난다. 인젝터 소음원은 상대적으로 ECU(engine control unit)의 제어 신호에 따라 운동하는 인젝터의 니들이 니들 시트부에 충돌하면서 발생하는 충격소음이다.

본 연구에서는 LPG 인젝터 소음 특성을 실험을 통하여 분석하고, 소음 저감 대책을 도출하고자 한다. LPG 인젝터의 정확한 소음 특성을 평가하기 위하여 엔진 소음을 배제할 수 있도록 LPG 인젝터만을 단독으로 구동할 수 있는 실험장치를 구성하였다. 그리고 다양한 엔진의 운동조건에 따른 인젝터의 소음을 분석하기 위하여 신호발생기와 압력조절기를 사용하여 엔진회전수 및 인젝터 구동압력의 변화에 따른 소음 주파수 특성을 분석하였다. 그리고 완제품 인젝터의 내부구조 변경에는 어려움이 있으므로 소음 저감을 위한 대책으로서 인젝터 외부에 흡음재를 적용하여 소음 저감 레벨 및 주요 주파수 대역의 소음특성을 분석한다. 여기에서 도출된 결과는 LPG 차량의 저소음형 인젝터를 개발하는데 중요한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 인젝터의 구조 및 소음발생 기구

2.1 인젝터의 구조

인젝터의 내부 구조는 Fig. 1에서와 같이 크게 다음과 같이 나눌 수 있다. 먼저 ECU에서 전기신호를 받아 자장을 형성하는 코일 와이어(coil wire)와 코일부(coil ass'y), 그리고 자로(magnetic circuit)를 형성하는 커넥터(connector) 및 하우징(housing), 그리고 연료의 분무형상과 유량을 결정하는 역할을 하는 보호캡(protective cap), 니들 시트(needle seat) 및 니들(needle)로 구성되어 있다^(2~4).

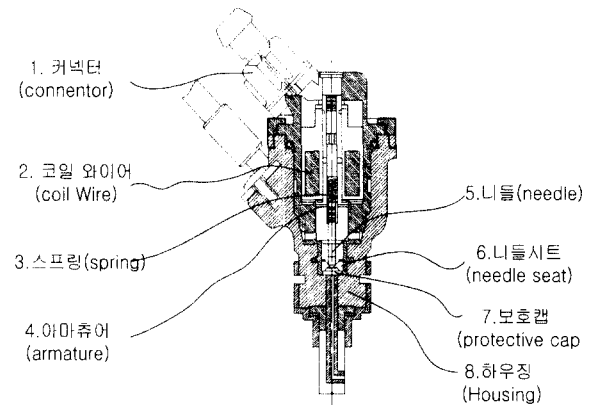


Fig. 1 The schematic of LPG injector

2.2 소음발생 기구

인젝터는 ECU로부터 단속적으로 공급되는 전류에 의해 작동이 된다. Fig. 1에서 ECU로부터 전류와 구동펄스를 커넥터로 받게 되면, 솔레노이드 코일에 전류가 흐르게 되고, 솔레노이드 코일에 자장이 형성되어 아마추어(4)를 구동하게 된다. 아마추어와 일체로 되어 있는 니들(5)이 스톱퍼(stopper)에 닿을 때까지 운동하여 최대 양정(max. lift)에서 정지하게 되고, 이 때 분사 밸브에서 연료가 분사된다. 그리고 솔레노이드 코일(2)에 전류가 단락 되면, 니들(5)이 코일 스프링에 의해 니들 시트에 단게 되어 연료의 분사를 단속하게 된다⁽⁵⁾. 인젝터는 엔진이 작동되는 동안에 엔진의 행정시간에 맞추어 이러한 밸브 개폐운동을 반복하게 되고, 이러한 과정에서 니들이 니들 시트에 닿는 순간 충격소음이 발생하게 된다. 이 충격소음이 인젝터 소음의 주원인이 된다. Fig. 2는 인젝터의 충격소음 발생 기구를 설명하기 위해 ECU 입력신호에 따른 인젝터의 작동순서를 나타낸 것이다. 첫 번째 과정(1번)에서는 ECU로부터 제어신호가 커넥터를 통하여 입력되는 과정으로 이때부터 니들이 상승하기 시작하며, 두 번째 과정(2번)은 니들이 상승한 상태에서 연료가 분사되는 과정이고 그리고 마지막 과정(3번)에서는 입력신호가 단락 되어 니들이 하강하는 과정을 거치게 된다. 이러한 상승, 분사, 하강하는 과정이 계속해서 반복되어 인젝터의 충격소음이 연속적으로 발생하게 된다. 따라서 충격소음은 구동펄스 및 구동주기에 따라

충격소음의 레벨 및 주파수 성분이 달라진다.

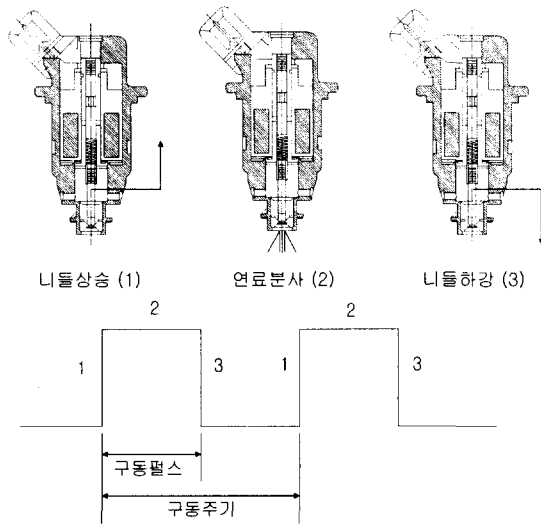


Fig. 2 Impact noise generation mechanism of LPG injector

3. 실험 장치 및 방법

인젝터 소음의 특성을 규명하기 위하여 Fig. 3에서와 같은 실험장치를 구성하였다.

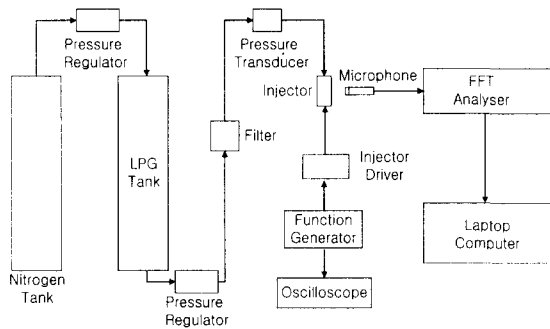


Fig. 3 Diagram of the experimental setup

본 연구에서는 서론에서도 설명하였듯이 LPG 인젝터의 소음 특성을 정확하게 평가하기 위해 엔진 소음을 배제할 수 있도록 LPG 인젝터만을 구동할 수 있는 실험장치를 구성하였다. 구동조건은

엔진에서의 구동조건과 동일하도록 인젝터의 구동 펄스와 LPG 압력을 신호발생기(function generator)와 압력조절기(pressure regulator)로 조절하였다. 실험장치는 연료 공급 부, 인젝터 구동 부, 데이터 측정 부로 크게 세 부분으로 나눌 수가 있다. 먼저 연료를 공급하는 연료 공급 부에서는 75 bar 이상의 고압 질소를 이용하여 LPG 탱크의 압력을 조절하는 방법을 이용하였다. 질소탱크 출구 측의 첫 번째 압력조절기로 LPG 탱크의 압력을 조절하고, LPG 탱크에서 인젝터로 공급되는 연료의 압력조절은 인젝터 전방의 두 번째 압력 조절기를 이용하였다. 그리고 LPG 연료의 불순물을 제거하기 위하여 60 μm 필터를 사용하였다. 두 번째는 인젝터 구동 부에서는 구동에 필요한 기본 전원(DC 12 V)을 전력공급기로부터 공급받고, 인젝터 구동 입력신호는 신호발생기로부터 원하는 엔진회전수에 맞는 인젝터 신호를 발생시키도록 하였다. 이 신호는 인젝터 구동기(injector driver)로 입력되어 인젝터가 구동된다. 세 번째는 데이터 측정 부로 소음 측정 센서인 마이크로폰과 주파수 분석기 그리고 컴퓨터로 구성되어 있다. 음압신호는 인젝터 전방에서 30 cm 떨어진 곳에 1/2" 마이크로폰을 설치하여 측정하였다. 소음 특성은 청감보정(A-weighting)을 적용하여 1/3 옥타브로 주파수 별로 분석하였고, 흡음재를 적용한 경우에도 같은 방법으로 소음을 분석하였다. 실제 차량이 받는 엔진의 부하는 주행 조건에 따라 변하나 본 실험에서 엔진 부하는 50 %로 일정하다고 가정하고 실험을 하였다. 실험조건은 실제 엔진 운전조건을 고려하여 구동펄스 및 구동압력을 각각 세 가지로 설정하였으며, 사용된 구동펄스에 동등한 엔진회전수는 1000(공 회전 조건), 2000, 4000 rpm이고, 구동압력은 8, 9, 10 bar이다. 따라서 실험조건은 엔진회전수와 구동압력에 따라 총 9 가지 조건이 된다. 인젝터의 구동주기는 Fig. 4와 같이 엔진회전수 1000, 2000, 4000 rpm에 대해 각각 120, 60, 30 ms로 되고, 구동펄스는 부하조건에 의해 각각 60, 30, 15 ms가 되며, 신호 크기는 실제 인젝터 구동 신호 전압인 5 V가 되도록 하였다. 그리고 흡음재의 성능은 Fig. 5와 같이 두 음향 탐촉자를 이용한 임피던스법(two microphone impedance tube method)을 이용하여 시험하였다^{6, 7}. 평면파 영역 내에서 입사 스펙트럼($S_{AA}(f)$)에 대한 반사 스펙트럼($S_{BB}(f)$)의 비, 즉 반사파의 반사 계수 $r_0(f)$ 를 구

하고 이를 이용하여 다음 식에서와 같은 수직 입사 흡음률 $\alpha_0(f)$ 를 구하였다.

$$\alpha_0(f) = 1 - |r_0(f)|^2 \quad (1)$$

$$\text{여기서 } r_0(f) = \frac{S_{BB}(f)}{S_{AA}(f)}$$

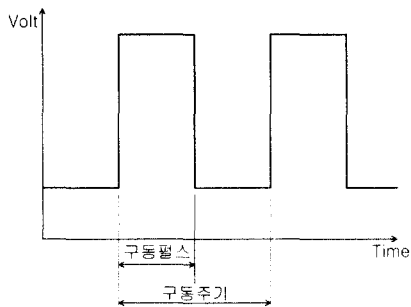


Fig. 4 Input signal of injector

흡음재료는 폴리우레탄 재료를 사용하였으며, 두께 10 mm와 20 mm 흡음재를 시험한 흡음 성능 곡선은 Fig. 6에서와 같다. 흡음재의 두께에 따라 많은 차이를 보이고 있으며 두께가 두꺼울수록 흡음 성능은 크게 향상되지만 본 실험에서는 공간 제약울 고려하여 두께 10 mm인 흡음재를 사용하였다. 그리고 흡음재를 실제 적용하는 측면에 있어서는 인젝터가 설치되는 흡입 매니폴더(manifold)측의 설치공간 확보 및 외관상의 고려가 필요하다.

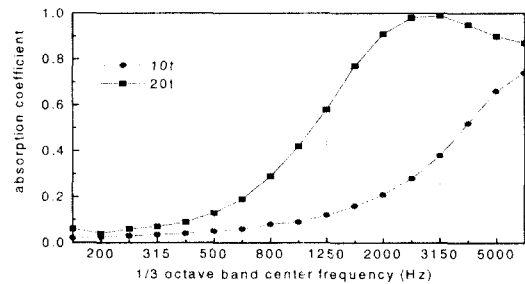


Fig. 6 Sound absorption coefficient curves of test material

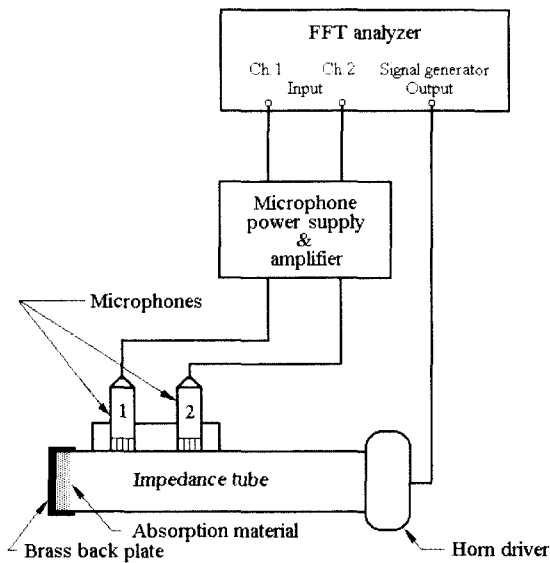


Fig. 5 Absorbing material test

4. 실험 결과

4.1 소음 특성 분석

일반적인 엔진의 운전 범위에서 인젝터의 소음 발생 특성을 분석하기 위하여 인젝터에 사용 가능한 구동압력과 일상 생활에 가장 많이 쓰이는 엔진회전수의 변화에 따른 소음 주파수 특성을 분석하였다.

엔진회전수를 일정하게 유지하고 구동압력을 8, 9, 10 bar로 1 bar씩 변화를 시킨 경우에 대한 소음 주파수 특성은 Fig. 7~9와 같다. Fig. 7~9에서 보면 인젝터의 소음 주파수 특성은 0.4~1.25 kHz와 5 kHz이상의 대역에서 조금의 차이를 보이나 구동압력의 변화에 따른 소음의 주파수 특성이나 전체 소음레벨의 차이는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이 결과는 우리에게 유용한정보를 제공해 준다.

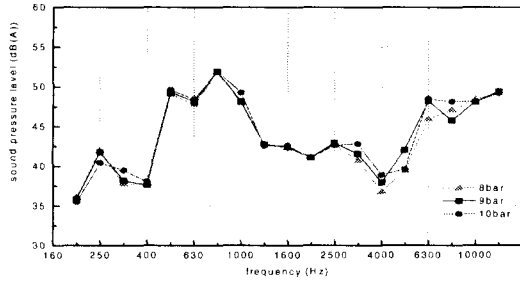


Fig. 7 Noise spectrum of injector at 1000 rpm

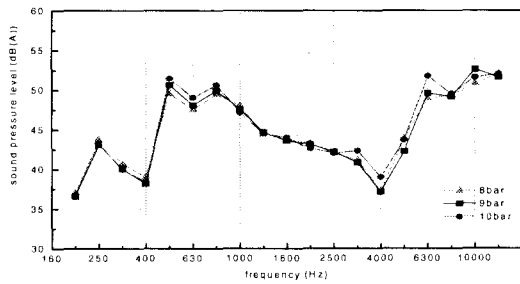


Fig. 8 Noise spectrum of injector at 2000 rpm

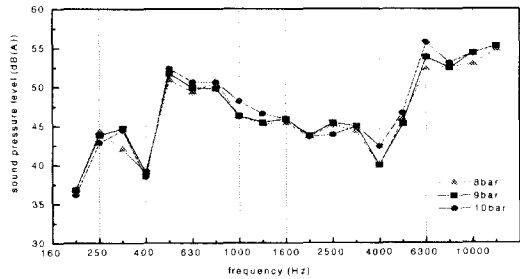


Fig. 9 Noise spectrum of injector at 4000 rpm

다시 말하면 인젝터 구동압력을 증가하더라도 소음레벨 상승이 거의 없으므로 분사 효율이나 LPG를 안전하게 액화 상태로 유지할 수 있는 측면에서 구동압력을 증가시켜 구동하여도 소음측면에서는 무방함을 알 수 있다. Table. 1은 구동압력과 엔진회전수에 따른 전체 소음레벨의 변화를 표로 정리한 것이다. 한편 압력을 일정하게 유지하고,

엔진회전수를 1000, 2000, 4000 rpm으로 변화시킨 경우에 대한 소음 주파수 특성은 Fig. 10~12에서와 같다. 일정 압력(8~10 bar)에서 엔진회전수의 증가에 따라 전 주파수에서 거의 같은 경향으로 소음레벨이 상승 하는 것을 볼 수 있다. 그리고 구동압력에 관계없이

Table 1 SPL values versus fuel pressure and engine revolution

단위 : dB(A)

| rpm \ 구동압력 | 8 bar | 9 bar | 10 bar |
|------------|-------|-------|--------|
| 1000 rpm | 58.6 | 58.8 | 59.1 |
| 2000 rpm | 59.7 | 60.0 | 60.5 |
| 4000 rpm | 61.7 | 62.3 | 62.9 |

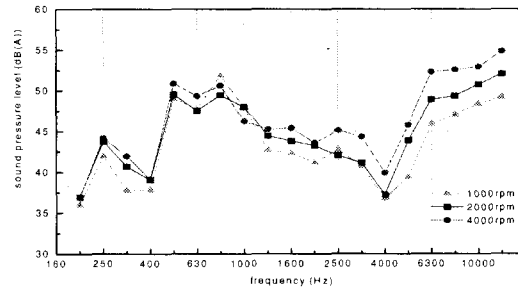


Fig. 10 Noise spectrum of injector at pressure of 8 bar

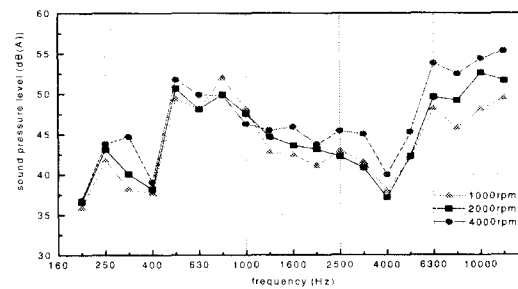


Fig. 11 Noise spectrum of injector at pressure of 9 bar

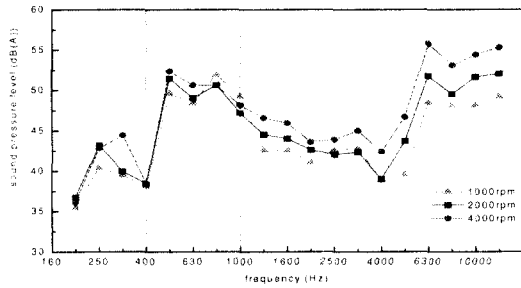


Fig. 12 Noise spectrum of injector at pressure of 10 bar

0.2 ~ 0.25 kHz, 0.4 ~ 1.25 kHz사이의 주파수에서는 엔진회전수에 따라 1~2 dB(A)정도 차이가 있지만 0.315 kHz와 1.25 kHz이상의 고 주파수 영역에서는 2~4 dB(A)정도로 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 인젝터의 소음레벨은 인젝터 구동압력보다는 엔진회전수에 따라 크게 변하는 특성이 있음을 알 수 있다. 이는 인젝터의 구동압력 즉 구동펄스의 지속 시간 및 구동주기에 따라 인젝터의 니들 밸브와 니들 시트의 충격형태가 달라지기 때문이다.

4.2 흡음재 효과 분석

LPG 인젝터 소음저감을 위한 대책으로서 우선 인젝터의 구조 변경을 하지 않고 가장 쉽게 접근할 수 있고 효과가 가장 클 것으로 기대되는 방법으로 인젝터의 연료 흡기구에 삽입되는 부분을 제외한 하우징부분에 흡음재를 적용하여 소음 저감 효과를 분석하였다. Table. 2는 일반 조건과 흡음재가 적용되었을 경우의 음압레벨과 그 차이를 나타낸다. 여기서 흡음재의 적용으로 전체 소음레벨이 1.5~3.7 dB(A)정도 저감되고 엔진회전수가 높아짐에 따라 소음 저감 레벨이 커짐을 알 수 있다. 구동압력에 따른 인젝터의 소음 특성이나 흡음 효과는 거의 변하지 않으므로 Fig. 13~15에서는 일정 구동압력(10 bar)을 기준으로 엔진회전수에 따른 흡음 효과를 나타내었다. 흡음에 의한 소음 저감주파수 특성을 보면, 전반적으로 4 kHz이하의 주파수 성분은 크게 줄지 않았으나 5 kHz이상의 주파수 성분은 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 6에 나타난 흡음재의 흡음 성

능 곡선에서도 잘 예측이 된다.

Table 2 SPL values with and without sound absorbing materials

단위 : dB(A)

| rpm | 조건 | 일반 조건 | 흡음재 적용 조건 | 소음저감 레벨 |
|----------|----------|-------|-----------|---------|
| | 1000 rpm | 8 bar | 58.6 | 57.1 |
| 9 bar | | 58.8 | 57.1 | 1.7 |
| 10 bar | | 59.1 | 57.4 | 1.7 |
| 2000 rpm | 8 bar | 59.7 | 57.9 | 1.8 |
| | 9 bar | 60.0 | 58.6 | 1.4 |
| | 10bar | 60.5 | 58.9 | 1.6 |
| 4000 rpm | 8 bar | 61.7 | 58.9 | 2.8 |
| | 9 bar | 62.3 | 59.1 | 3.2 |
| | 10 bar | 62.9 | 59.2 | 3.7 |

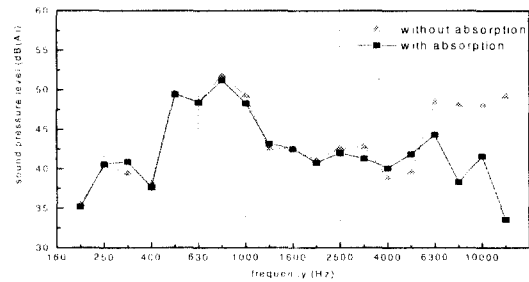


Fig. 13 Noise spectrum of injector with absorbing material at 1000 rpm

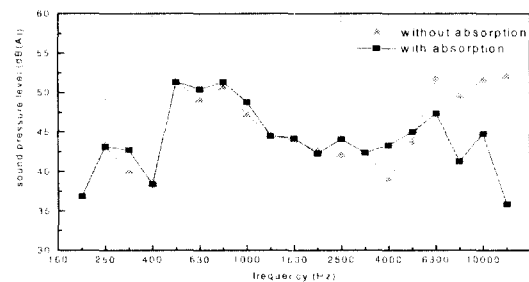


Fig. 14 Noise spectrum of injector with absorbing material at 2000 rpm

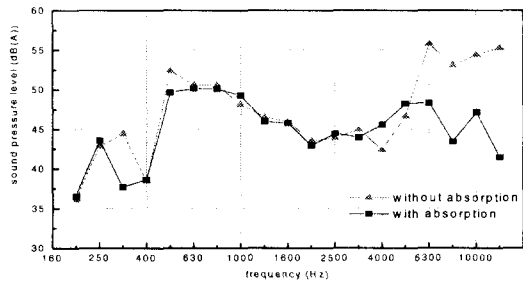


Fig. 15 Noise spectrum of injector with absorbing material at 4000 rpm

특히 엔진회전수가 4000 rpm일 경우에는 5 kHz이상의 소음레벨이 전체 소음레벨을 좌우하고 있으며, 흡음재의 효과가 크게 나타남을 알 수 있다. 4000 rpm보다 높은 엔진회전수의 경우는 더 큰 흡음 효과를 나타낼 것이며 흡음재 적용으로 전체 소음레벨을 크게 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

참고적으로 LPG 인젝터 소음 저감 대책으로는 본 연구에서와 같이 흡음재를 사용하여 소음의 전달 경로를 차단하는 방법이 있겠지만 소음원 자체의 소음레벨을 저감시키는 방법도 생각해 볼 수 있다. 즉 인젝터 내부의 충돌부위를 강성이 작은 재료로 대체하거나 코팅하여 인젝터의 개폐에 따른 충격을 완화시키면 충격소음이 상당량 저감될 것으로 판단된다. Fig. 16~17은 참고로 니들과 니들 시트사이에 연성 재료를 코팅하는 방법과 링 모양의 재료를 끼우는 방법을 제안한 것이다. Fig. 16은 충돌 부위에 코팅재료를 씌우는 방법을 나타내고 있다.

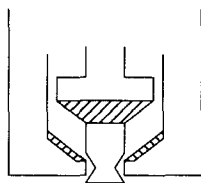


Fig. 16 Impact noise reduction by soft material coating

Fig. 17에서는 니들 시트(a)나 니들(b)에 유연한 링

을 설치하여 충돌 면적과 충격을 줄이는 방법을 나타내고 있다. 본 연구에서는 인젝터의 제작상의 어려움으로 이와 같은 방법을 적용하여 평가하는 방법을 도입하지 않았으나 향후 이러한 연구도 필요한 것으로 판단된다.

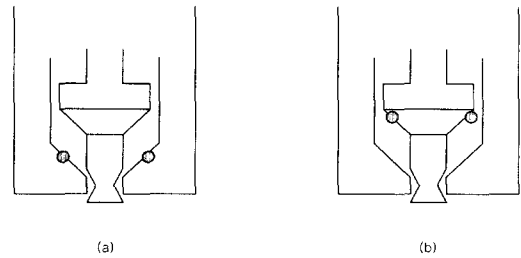


Fig. 17 Impact noise reduction by soft ring

5. 결론

본 연구에서는 실차 조건과 동일하면서도 엔진 소음을 배제할 수 있는 인젝터 구동 실험장치를 구성하여 인젝터 소음 특성을 규명하고 인젝터의 소음저감 대책을 수립하였다. 엔진회전수와 구동압력에 따른 LPG 인젝터의 소음 특성과 흡음재를 적용한 경우의 소음 저감 특성을 정리하면 다음과 같다.

1. 주어진 엔진회전수에서 구동압력을 변화시켜도 인젝터의 소음 주파수 특성은 거의 변화가 없었으며, 소음레벨도 1 dB(A)이하의 변화를 나타내었다. 그러므로 인젝터의 분사 효율이나 LPG의 안전한 액화 상태 유지를 위해 구동압력을 높여도 소음 측면에서는 무방할 것으로 판단된다.
2. 엔진회전수의 증가에 따라 인젝터의 소음 주파수 특성은 크게 변화되지 않으나 전체 소음레벨은 2~4 dB(A)정도 상승하고, 특히 5 kHz이상의 주파수 대역에서 소음레벨의 증가가 두드러짐을 알 수 있다.
3. 흡음재를 적용한 경우의 흡음 효과는 엔진회전수가 높아질수록 증가한다. 그리고 흡음재의 흡음 성능에 의해 5 kHz이하의 주파수 성분에 대해서

는 소음 저감 효과가 거의 없지만 4 kHz 이상의 주파수 성분에서는 큰 효과를 나타내고 있다. 특히 5 kHz 이상의 소음 성분이 전체 소음레벨을 좌우하는 4000 rpm 이상의 고속 회전 조건에서는 큰 소음 저감 효과를 나타낼 것으로 판단된다.

후기

본 연구는 과학기술부·한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. KSAE 2000 Engine Workshop, Alternative Fuel/Gas Engines & Low Emission Technologies, pp. 50~54, 2000.
2. 김재휘, 자동차가솔린분사장치(가솔린분사장치 실무편), 중원사, pp. 68, 1989.
3. 김재휘, 자동차기관II(디젤기관), 중원사, pp. 180~182, 1995.
4. T. K. Garrett, Automotive Fuels and Fuel System, Pentech Press, pp. 61~69, pp. 115~117, 1994.
5. 김재휘, 자동차가솔린분사장치(자동차전자제어 이론편), 중원사, pp. 120~125, 1992.
6. 강성우, 김양한, “두 개의 음향 탐촉자를 이용한 소음기의 투과 손실 측정과 오차 해석,” 한국소음진동공학회지, 제2권, 제3호, pp. 181~192, 1992.
7. 정진년, 김원진, “투과손실 실험결과를 이용한 자동차용 소음기의 해석모델 개선,” 한국정밀공학회지, 제18권, 제9호, pp. 204~209, 2001.