

질량법칙을 이용한 연료펌프 특정음 저감 방법

Particular Noise Reduction Method used to Mass Law

강태식*·심재기**

Gang tae sik, Sim jae gi

Key Words : Fuel Pump(자동차연료펌프), Mass Law(질량법칙), Noise(소음), Vibration(진동)

ABSTRACT

High frequency noise of fuel pump has does claimed by user. But high frequency of fuel pump can't heat in the car. But this noise is an offensive noise outside car. In this study is noise reduction used to mass law. Especially high frequency (for example BPF(blade pass frequency)) is influenced of this law. In detail used to transmission and add to mass according to mass law, reduced particular noise. As a result high frequency is down until can't perception.

1. 서론

현대의 자동차는 단순한 운송수단이 아닌 생활의 필수품으로 자리를 잡아가고 있다.

그래서 자동차는 안전성과 더불어 소음을 중요한 차량의 성능으로 판단한다. 특히 고가의 자동차가 출시되는 지금의 시대는 무엇보다도 소음에 대한 문제가 크게 대두되고 있다.

자동차에 시동을 걸면 자동차의 ECU는 몇 초 동안 메인 릴레이를 작동시켜 연료 펌프를 돌려주고 일정시간이 지나면 메인 릴레이 전원을 끊어 연료 펌프 동작을 중단시킨다.

이러한 기능은 원활한 시동을 위하여 연료의 잔압을 유지시키기 위해서 이다 또한 연료라인에 연료를 공급하여 압력을 일정하게 유지함으로 시동을 걸었을 때 엔진의 부조를 막아주고 엔진이 걸렸을 때는 엔진에 연료를 공급하는 역할을 한다.

이렇게 자동차에서의 연료펌프는 자동차에 연료를 공급해주는 기본적인 기능 이외에도 배터리(battery)에서 제일 먼저 전원을 공급 받아 구동 되므로, 운전자나 승객에게 제일 먼저 노출된다.

특히나 거의 모든 승용차에서의 연료펌프는 뒷자석 아래 연료탱크와 일체식으로 되어 있는 인탱크(Intank)식이기 때문에 더욱 더 민감하게 운전자에게 소음이 전달된다⁽¹⁾

이번 논문에서는 고주파소음, 특히나 임펠라가 통과하는 대역인 7KHz 대역의 소음을 감소시키고자 하였다.

이 영역의 소음의 특성은 파장이 짧아 차량의 실내에서는 시트(seat)에 차단되어 들리지 않지만, 차량 외부로 방사되는 소음이 큰 문제로 대두되고 있다.

연료탱크 안에 장착된 펌프는 외부로 바로 방사되기 때문에 현재 차단이 불가능하다.

그러므로 연료펌프 및 모듈상태에서 감소를 시키지 않는 이상, 그대로 외부로 방사되는 결과를 초래한다.

그래서 이 특정음을 차단하기 위해 질량법칙을 사용하여 임펠라 주파수를 감소 시켰다.

이에 대한 방법으로 펌프 모듈에 질량을 부가하여 임펠라음을 감소시키고자 하였다.

2. 연료펌프 구조 및 소음발생 메커니즘

2-1 펌프 모듈 및 연료펌프 구조

연료펌프의 구조를 살펴보면 펌프는 Sender gauge 와 filter 가 하나의 모듈로 제작되어 자동차 연료탱크에 부착된다.

Fig.1 은 자동차에 사용되는 모듈화(Module)된 연료펌프 모듈을 보인다.

여기에는 센더게이지(Sender Gauge)라는 연료레벨 게이지와 Pressure Regulator 가 연료펌프와 일체식으로 구성된 리턴레스 시스템(Returnless System)이다.

* 현대산업

E-mail : trust88@hyundam.com

Tel : (041) 539-7318, Fax : (041) 539-7340

** 조선대학교 기전공학과

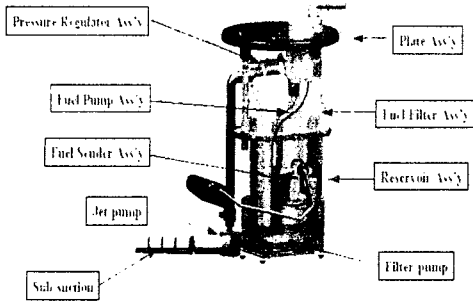


Fig.1 Scheme of Fuel Pump Module

Fig.2는 연료펌프 단품의 구조를 나타낸다.

연료펌프는 강한 회전력을 얻기 위해서 DC 모터를 채용하여 공기와 차폐된 연료 속에서 동작을 한다. 펌프의 하단에는 임펠러(Impeller)가 장착되어 회전력으로 연료를 에어갭(Air-gap)으로 송출한다.

이 연료는 펌프외부에 설치된 체크밸브(Check valve)를 거쳐 연료라인으로 공급된다.

체크밸브(Check valve)는 키-오프(key-off)시 연료 펌프(Fuel Pump)와 레일(Rail)간 연료의 양 및 압력을 일정하게 유지 시키는 역할을 한다.

연료라인에 문제가 발생하였을 때 (예:라인의 압력이 규정값 이상으로 올라갔을 때)는 펌프의 상단에 설치된 릴리프밸브(Relief valve)가 열려 연료를 탱크내로 직접 순환시킨다.⁽²⁾

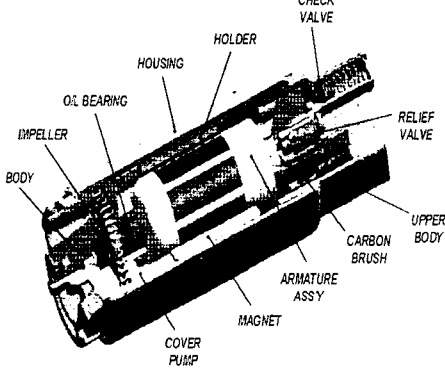


Fig.2 Scheme of Fuel Pump

2.2 소음발생 메커니즘

연료펌프는 영구자석을 이용한 DC 모터를 사용한다. 아마추어(Armature)의 도선에 흐르는 전류와 펄드 자속의 상호작용에 의해 토크가 작동하여 아마추어(Armature)가 회전한다⁽³⁾

그래서 필연적으로 전동기 자체에서 소음이 발생한다. 특히나 엔진소음이 과거에 비해서 현저하게 저감 되었으므로, 상대적으로 엔진을 작동시키전 key-on 을 했을 때 연료펌프의 작동에 의해서

소음이 발생하여 고객의 불만을 사 왔다.

연료와 공기중의 음속이 다르기 때문에 공기중에는 극단적으로 파장이 짧아 지기 때문에 간섭발생이 쉽고, 연료 중에는 이것이 없는 것이 큰 영향이라고 생각된다.

또 이것에 의해 tank 내부로부터 실차 전달 특성은 복잡하다

자동차용 DC 모터는 내부에 회전자(Armature)와 고정자(Magnet)가 있는 회전체 진동이며, 그들 사이의 전자기력에 의해 구동 되는 전기기계이다.

연료펌프의 기계적인 요인에 의한 모터의 진동은 식(1)과 같이 회전주파수의 배수성분으로 표현한다

$$F_n = \frac{kN}{60} \quad k:\text{정수} \quad N:\text{rpm} \quad (1)$$

이 수식을 기본으로 밸런싱 불량, 축 정렬 불량, 베어링 불량 등 기계적인 진동과, 회전자와 고정자 사이에 존재한 공극의 자속밀도가 불균형 하여 발생하는 전기적인 진동, 소음이 발생한다⁽⁵⁾

연료펌프에 의한 진동은 펌프 안의 모터로부터 진동이 연료펌프 안의 연료와 차 안의 공기 매질을 통해 실내로 전달되는 고체음(Structure-Borne Noise)에 기인한다.

만약에 연료펌프 rpm 이 7200 이라면 수식(1)에 의해서 7200/60 인 120Hz 에서 first order 가 발생하고 이 후에는 그에 대한 하모닉(Hamonic)성분이 발생한다.

현재 양산되고 있는 연료 펌프의 DC 모터는 정류자편이 8 개이므로 1 차 회전주파수가 120Hz 임을 감안하면 960 과 1920Hz 에서 발생한다.

정류자와 브러시가 간섭하는 부분의 주파수 대역은 1Khz 와 2Khz 에 가까운 주파수이므로 사람에게 민감하게 작용할 뿐만 아니라 고체음 이므로 실제 차량의 연료탱크 안에 있더라도 전달되는 음이다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾

마지막으로 임펠라의 날개수가 47 매킨 관계로 깃 통과주파수 (BPF:BLADE PASS FREQUENCY)가 5640 Hz 에서 발생한다

3. 이론적 배경

(1) 이론적 배경

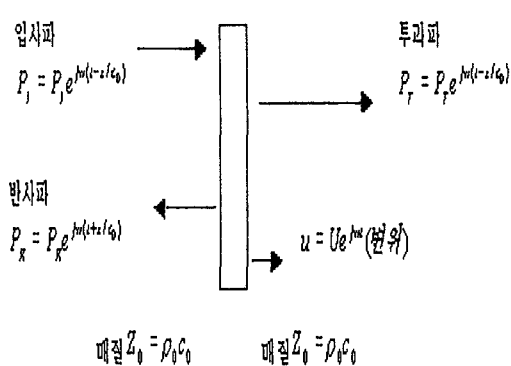


Fig.3 reflected wave & transmitted wave

뉴턴 제 2 법칙으로부터⁽⁸⁾

$(P_I + P_R) - P_T = -m\omega^2 U$ 이라는 식이 성립되고 오른쪽과 왼쪽의 입자속도가 같아야 하므로

$$\frac{P_I}{Z_0} - \frac{P_R}{Z_0} = j\omega U \quad (\text{왼쪽}) \quad (2)$$

$$\frac{P_T}{Z_0} = j\omega U \quad (\text{오른쪽}) \quad (3)$$

입사파에 대한 반사파의 비와, 입사파에 대한 투과파의 비(투과계수 τ)를 구하면

$$\frac{P_R}{P_I} = \frac{j\omega m}{j\omega m + 2Z_0} \quad (4)$$

$$\frac{P_T}{P_I} = \frac{2Z_0}{j\omega m + 2Z_0} \quad (5)$$

w 는 주파수 m 은 질량을 나타내고, Z_0 는 매질의 임피던스 값을 나타낸다.

파워투과계수를 다음과 같이 정의하고

$$|\tau|^2 = \left| \frac{P_T}{P_I} \right|^2 \quad (6)$$

먼저 전개했던 투과계수 식을 이용하면

$$|\tau|^2 = \frac{(2Z_0)^2}{(wm)^2 + (2Z_0)^2} \quad (7)$$

일반적으로 질량법칙이란 질량을 부가할 경우 진동수가 변화하는 원리를 이용한 것으로 다음과 같은 투과손실(transmission ; TL, R_{TL})을 이용하게 된다.

$$R_{TL} = 10 \log_{10} \frac{1}{|\tau|^2} \quad (8)$$

여기서 τ 는 투과계수를 나타낸다.

따라서 위 식으로부터 투과손실은

$$R_{TL} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{wm}{2Z_0} \right)^2 \right] \quad (9)$$

와 같이 표현된다.

이 식은 투과손실은 2 배 증가(1octave)함에 따라 6db 씩 증가하며, 단위 면적 당 질량의 2 배 증가(1octave)함에 따라 투과손실이 6db 씩 증가한다는 의미를 지닌다.

위식은 매질의 임피던스에 의해 주파수나 질량의 값이 매우 크다고 가정하면

$$\frac{wm}{2Z_0} \gg 1 \quad \text{이면}$$

$$R_{TL} \cong 20 \log_{10} \frac{wm}{2Z_0} \text{ dB} \quad (10)$$

위식을 다시 투과손실이 0 이 되는 주파수(f_b)를 생각해 보면

$$\frac{2\pi f_b m}{2Z_0} = 1 \quad (11)$$

$$\text{그러므로 } f_b = \frac{Z_0}{\pi m} \quad (12)$$

4. 실험

4.1 실험장치 구성

반 무향실 안에서 연료펌프를 연료탱크 안에 장착하여 상단에 마이크로폰을 위치하였다.

Fig.4 에 간략적인 측정 개략도를 나타내었다.

마이크로폰은 연료펌프에서 발생하는 소음을 Pick-up 하여 주파수 분석기로 보내면 주파수 분석기에서는 고속 프리에 변환을 하여 그 결과를 컴퓨터에 나타낸다.

관심을 두고 있는 주파수가 고주파 영역이므로 0~10KHz 영역까지 조사하였다.

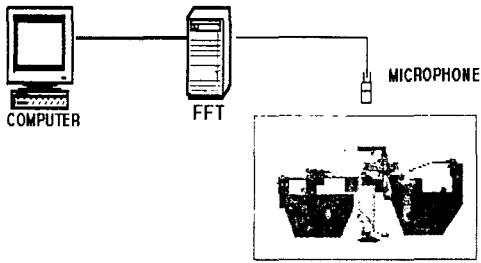


Fig.4 Experimental setup

Fig.5 는 Fig.4 에서 탱크 조립상태의 실험을 더 자세히 설명하기 위해 무향실 내의 탱크 측정방법을 나타내었다.

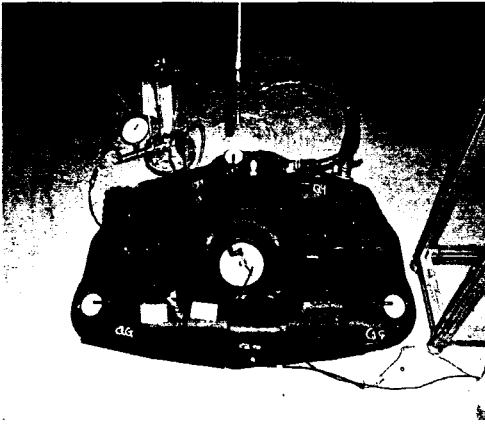


Photo.1 Measurement of tank ass'y

마이크로폰의 위치는 연료탱크 상방 10cm 로 하고 측정을 하였다

연료량에 따른 소음의 변화가 있기 때문에 이 실험에서는 연료량은 20L 로 하였다.

실험수순은 먼저 질량 가중체를 부착하지 않는 경우와 , 질량 가중체를 부착한 경우를 측정하여 비교하였다.

이 실험에 사용되는 질량가중체를 붙이는 위치는 filter ass'y 상단에 위치 시켰다.

Fig.5 에서는 이러한 질량 부착 위치를 도식적으로 나타내었으며 더 자세히 설명하면 연료펌프 모듈에서 Plate 를 제거 한 후 여지필터 상단부분에 질량을 위치시켰다.

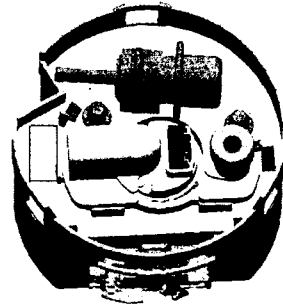


Fig.5 Location of mass

4-2 측정장비

이 실험에 사용된 계측기를 photo.2 에 나타내었다

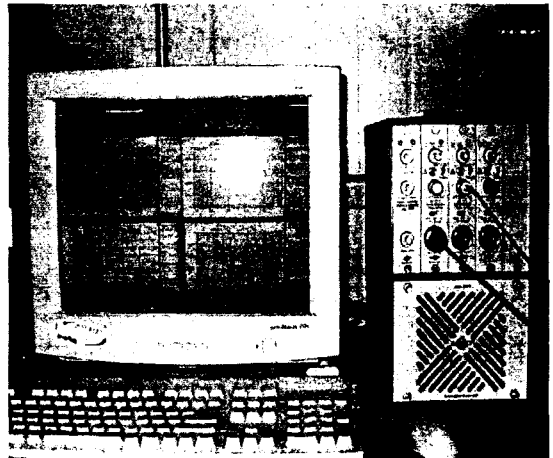


Photo.2 Test Equipment

본 실험에 사용되는 장비 사양은 다음과 같다.

Table.1 Specification of test equipment

Item	Specification
PC 운영체제	Window NT 4.0
FFT	PULSE 4.2 (B&K)
Micro-phone	2669(B&K)
Front-End	TYPE 2825

5. 결 과

5.1 예상결과

질량법칙에 의하면 5640Hz 주파수를 저감 시키려면 1.5kg 을 붙였을 때 132/1.5Kg=88Hz→176Hz→352Hz → 704Hz →1408Hz →2816Hz → 5632Hz 순으로 감소가 일어난다는 것을 알 수 있다.

그러나 금번 실험한 차량의 펌프를 확인해본 결과 13.9V 에서 7100Hz 부근에서 BPF 가 발생하고 있다.

물론 RPM 은 수식(1)에 의해 $176 \times 60 = 10000$ Hz 부근에서 회전하고 있다는 것을 알 수 있다.

이미 전개했던 수식에 의거하여 이 음역을 감소시키기 위하여 150g 의 질량을 부가하였다.

계산식에 따라 $880\text{Hz} \rightarrow 1760\text{Hz} \rightarrow 3520\text{Hz} \rightarrow 7040\text{Hz}$ 대역에 영향이 있음을 예상하고 평가하였다.

그리고 임펠라 주파수는 18dB 정도 감소될 것이라고 예상하고 실험을 행하였다.

5.2 실험결과

Fig.6~Fig.7 에서 나타난 결과와 같이 실험 그래프를 확인하여 보면 계산식에 의한 결과 18dB 아니지만 주파수가 고주파음(BPF)이 10db 이상 줄어들었음을 확인하였다

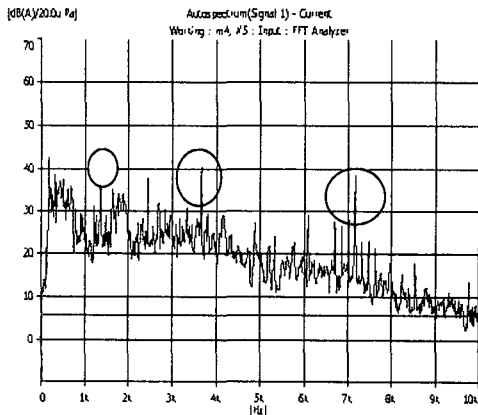


Fig.6 Noise Graph non-mass

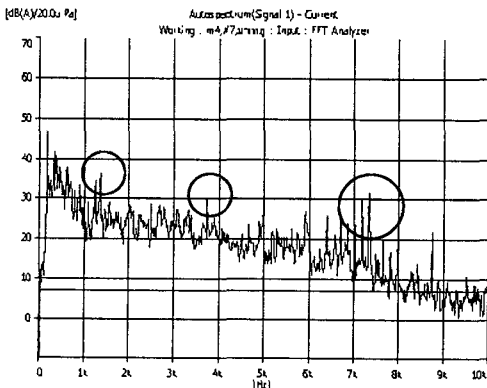


Fig.7 Noise Graph add to mass

또한 이미 예상했던 대역인 1700Hz 영역, 3200Hz 대역 2 절 수식에서 설명했던 각주파수의 2 배 되는 주파수대역의 피크점

(Fig.6 에서 표시되는 부분)들이 모두 낮아지는 결과를 가져왔다.

이것은 질량법칙을 사용하여 연료펌프의 특정음 저감이 가능하다는 것을 확인하였다.

그러나 계산식에 의한 특정 주파수가 아니고 측정주파수 부근의 소음 피크점들이 모두 감소하였다. 이것은 만약에 계산상 147g 의 질량이 필요하다더라도 150g 의 질량을 부가하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다는 것을 예상할 수 있다.

6. 결론

연료펌프 모듈에 질량가중체를 부착하여 특정음을 줄이고자 하는 실험의 소음평가에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 연료펌프 모듈에 질량가중체를 부가함으로 특정음을 줄이는 것이 가능하였다.
2. 특히 연료펌프의 BPF(기통과 주파수) 주파수인 경우에 소음 레벨이 크게 감소하는 결과를 나타내었다.
3. 특정음을 줄이고자 질량법칙을 사용하면 특정음 뿐만 아니라 그 부근의 음이 동시에 감소하였다, 이것은 정확한 질량을 부가하지 않더라도 비슷한 질량을 부가하여도 동일한 효과를 얻을 수 있음을 예측할 수 있다.
3. 현재 자동차의 경량화 추세인 현실을 감안하면 질량법칙을 사용하여 저주파를 줄이는 것보다는 고주파를 줄이는 것이 적은 질량으로도 가능하여 향후 적용이 가능하다.

참고문헌

- (1) 加藤 哲男, 磁石の世界. コロナ社, pp.106 ~ 107, 1999
- (2) 두원정공, EFI 가솔린 Engine 용 연료펌프에 관한 기술개발, pp.10~ 20, 1992
- (3) 김상진, 소형모터제어, 성안당, pp 3~4, 2001
- (4) Couji Umemura 외 2인, Study on Impeller Noise of In-yank fuel ump sound field characteristic in fuel pump, pp.1.413~1.416, 日本自動車技術 學術講演會前刷集 902, 1990-10
- (5) 차원준, 최연선, 6 시그마 프로세스를 이용한 소형지류모터의 소음저감, 소음진동공학회 2002년 춘계대회논문집, pp.509~514
- (6) 백수현, 소형모터 설계편람, 세화출판사, pp.727~739, 1988
- (7) 大天王吉, 페라이트 자석회전기의 설계, 통일출판사 pp. 35~40
- (8) L.L.Neranek and I.L. Ver, Noise and vibration control Engineering-Principles and Application, John Wiley & Sons, New York, 1992, chapt. 9, pp284-304