

연료공급 장치의 진동 특성에 대한 연구

A study on the characteristics of vibration in fuel pump system

권요섭† · 김찬목* · 강태원* · 사종성** · 강태식***

Joseph Kwon, Chanmook Kim, Taewon Kang, Jongsung Sa, Taesik Kang

Key Words : fuel pump(연료펌프), fuel tank(연료탱크), order analysis (차수분석), vibration(진동)

ABSTRACT

The comfort and quietness of vehicle has been improved greatly due to the development of technology in automobile industry. It is driven by reduction on the level of vibration and noise in powertrain system. However, the hidden problems in automobile parts become noticeable since the vehicle has been better in overall performance. One of them is related to the fuel pump system. Therefore, this study is focused on investigating the characteristics of fuel pump and fuel tank first, and then comparing the data before and after installation of fuel pump system in a testing vehicle. Additionally, the measured data will be analyzed to identify the problems and find a solution to improve the level of noise and vibration in fuel pump system.

1. 서론

자동차의 기술발전과 성능향상으로 인하여 차량의 정숙성은 과거에 비해서 크게 개선되었다고 볼 수 있다. 이는 차체의 고 강성과 엔진을 비롯한 동력기관(powertrain)의 저 진동, 저 소음 기술의 발전에 힘입은 바 크다고 하겠다. 하지만, 차량의 정숙성이 향상되면서 과거에는 크게 문제되지 않았던 부품들

의 소음진동현상이 새롭게 나타나고 있다. 이 중에서도 연료펌프를 포함한 연료공급 장치에서 발생하는 소음과 진동현상이 대표적이라 할 수 있다.⁽¹⁾

연료공급 장치는 연료탱크와 그 내부에 위치한 연료펌프, 증발가스 포집장치(canister), 연료레일(fuel rail) 및 분사장치(injector) 등으로 구성된다. 여기서 연료탱크 내부에 위치한 연료펌프의 작동과정에서 발생하는 소음현상이 차량 탑승객에게 인지되어 불만을 야기할 수 있다. 이러한 현상은 그동안 실내 소음에 의해서 차폐(masking effect)되었던 소음현상이 차량의 정숙성이 크게 향상되면서 부각된다고 볼 수 있다. 연료펌프 및 연료탱크의 진동소음특성에 대한 연구는 측정방법, 연료탱크 내부 액체의 음장, 연료펌프 자체의 고압생성이나 탱크 내부의 슬로싱(sloshing)현상 및 격막(baffle)에 대한 연구들

† 책임저자; 정회원, 국민대학교 자동차전문대학원
E-mail : ziebart@hotmail.com
Tel : (02) 919-0514, Fax : (02) 910-4718

* 정회원, 국민대학교 기계자동차공학부

** 정회원, 서울대학 자동차과

*** 정회원, 현대산업 시험평가팀

이 진행된 바 있다⁽¹⁻⁵⁾. 또한, 연료펌프의 진동검사 기법과 부가질량, 임펠러 특성 등에 대한 연구도 발표되었다⁽⁶⁻⁸⁾. 이러한 연구들을 살펴보면 실제차량에 적용한 사례는 드물다고 볼 수 있으며, 차량에 탑승한 승객의 관점에서 연료공급 장치의 진동소음현상에 대한 더 많은 연구를 필요로 한다. 본 연구에서는 연료공급 장치의 대표적인 부품인 연료펌프 및 연료탱크의 단품특성을 파악한 후, 이를 실차에 적용시켰을 때 발생하는 진동현상을 비교 분석하여 개선방안의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연료펌프

2.1 연료펌프 구성

연료펌프는 연료분사방식의 가솔린엔진에서 인젝터에 공급되는 연료를 유효한 압력으로 송출하는 부품이며, 전기모터에 의해서 구동되는 터빈방식의 임펠러가 장착되어 있다. 연료펌프의 작동방식은 시동키를 삽입한 후, ON위치(ignition 위치)에서 연료펌프가 약 3초간 작동되었다가 멈춘다. 이는 연료공급 라인의 정상적인 압력을 상승시켜 시동성능을 향상시키기 위함인데, 일부 예민한 탑승객들이 감지할 수 있으나 고려하지 않았다. 시동키가 ON위치에서 START위치로 이동되어 스타트 모터가 구동되면서 연료펌프가 가동되기 시작하여 엔진시동을 끝 때까지 정상적으로 작동하게 된다.

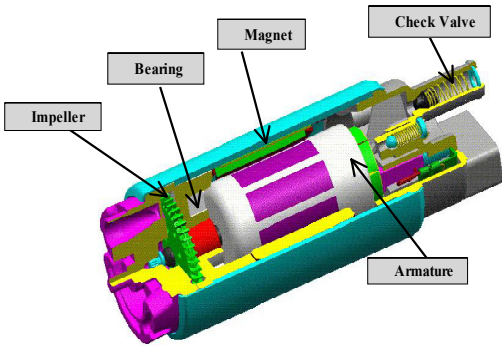


Fig.1 Schematic of fuel pump

Fig.1과 같이 연료펌프의 구조는 내부에 회전자(armature)와 고정자(magnetic)가 있어 전자기력을 형성하여 구동되며 그밖에 구성요소로는 베어링(bearing)과 임펠러(impeller)가 있다.

연료펌프 어셈블리는 연료펌프 모듈(module)이라고도 부르며, 연료펌프, 압력조절기, 센더 게이지(sender gauge) 등으로 구성된다.

연료펌프의 진동 특성을 파악하기 위해서는 연료펌프 자체의 단품, 어셈블리상태, 연료탱크 내부에 장착된 경우 및 실차에 이르기까지 변화 현상을 측정하였다.

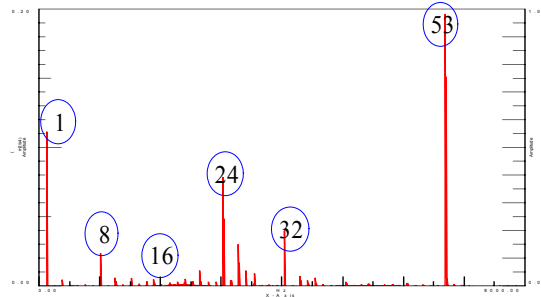


Fig.2 Fuel pump vibration signal

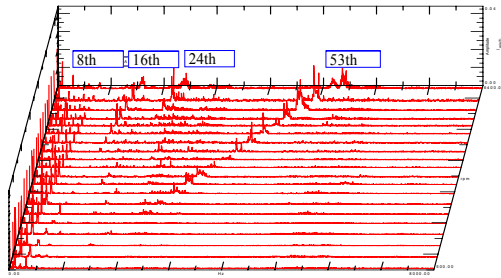
Fig.2는 연료펌프 단품 상태에서 Z축 방향의 진동 특성을 측정한 결과이며 숫자는 회전차수를 나타낸다. 여기서 회전 차수는 연료펌프 임펠러의 날개깃(Blade, 53개)과 정류자편(8개) 및 회전수(7200rpm)와의 관계에서 발생한다⁽⁸⁾.

2.2 단품평가(연료펌프)

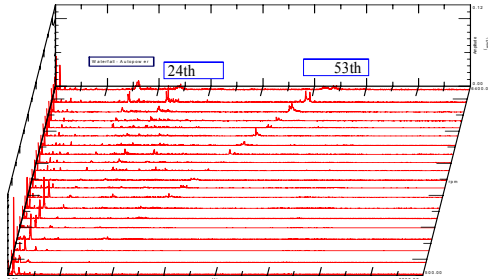
고속 회전하는 연료펌프 내부의 날개깃과 정류자편 등의 영향으로 많은 차수(order)가 존재하므로 차수 분석을 시도하였다. Fig.3은 연료펌프 단품의 측정 방향에 따른 진동 측정 결과이다. 가로축은 진동수, 세로축은 진동값의 변화를 수직축은 회전수를 각각 나타낸다.

차수분석결과 8차, 16차, 24차 성분은 정류자편의 영향이 하모닉 성분으로 나타난 것이며 53차의 성분은 연료펌프의 임펠러의 날개깃 통과 주파수(BPF: Blade Pass Frequency, 이하 BPF) 이다⁽⁶⁾.

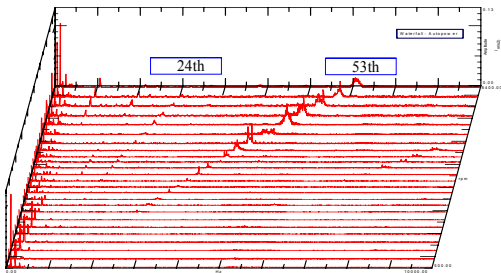
연료펌프 단품시험은 실제 차량에 인가되는 전압과 유효압력을 사용하였고 신뢰성 있는 데이터 확보를 위해 10개의 샘플을 정하여 실시하였다.



(a) x-axis



(b) y-axis



(c) z-axis

Fig.3 Fuel pump waterfall data

시험결과를 진동식에 의해 회전주파수를 분석하였고 Table1에서의 결과와 같이 100~113Hz의 범위로 1차 주파수가 측정되었다.

Table1 Test result of fuel pump

Z축	1차 주파수 (dB)	깃 통과 주파수 (dB)	24차 주파수 (dB)
# 1	108.75 (60.91)	5775.00 (72.872)	2615.00 (64.700)
# 2	100.00 (56.14)	5306.25 (77.795)	2403.12 (58.150)
# 3	106.88 (54.05)	5663.75 (69.050)	2564.38 (72.152)
# 4	106.25 (49.93)	5630.62 (71.082)	2549.38 (71.368)
# 5	110.62 (52.04)	5852.50 (70.529)	2650.62 (71.938)
# 6	105.00 (62.32)	5577.50 (70.516)	2525.62 (74.847)
# 7	100.62 (61.74)	5346.88 (73.109)	2420.62 (67.160)
# 8	109.38 (58.29)	5790.62 (68.700)	2617.50 (65.460)
# 9	100.62 (61.34)	5331.25 (79.290)	2413.75 (70.091)
# 10	113.12 (53.57)	6001.88 (68.400)	2781.12 (67.800)

BPF는 5300~6000Hz의 내외에서 측정되었고 24차 주파수는 2400~2650Hz 영역에서 측정되었다.

2.3 연료펌프 장착상태 평가

연료펌프 단품의 특성을 파악한 후 어셈블리 체결 진동특성 변화는 Table2와 같다.

Table2 Test result of fuel pump assembly

	1차 주파수 (dB)	BPF (dB)
#1	124.38(55.34)	6584.38(47.35)
#2	116.25(52.17)	6251.25(58.03)
#3	124.38(56.98)	6581.88(39.67)
#4	121.88(47.48)	6485.62(49.42)
#5	129.38(52.96)	6861.88(54.23)
#6	126.25(69.02)	6686.25(41.72)
#7	128.75(37.39)	6862.50(37.65)
#8	131.25(51.61)	6956.25(45.18)
#9	130.62(56.80)	6918.75(47.49)
#10	131.25(57.18)	6957.50(41.72)

어셈블리에서는 110~130Hz의 범위에서 1차 주파수가 측정되었으며 BPF는 6250~6950Hz의 대역에서 측정되었다. 이 결과를 통해 연료 펌프의 단품 일 때와 어셈블리 체결 시 주파수의 변화가 1차 주파수에서는 약20Hz, BPF는 약1000Hz의 변화를 있음을 알 수 있다.

3. 시스템 평가(연료탱크)

3.1 연료탱크의 구조 및 모드해석

연료탱크는 후방 승객석의 착석부위 아래쪽에 장착되므로, 후방탑승객에게 소음이 들리기 쉬운 구조라 할 수 있다. 연료탱크 내부의 연료량에 따라서 연료 펌프 및 탱크에서 발생하는 소음현상이 조금씩 달라질 수 있다⁽¹⁾. 본 연구에서 고려한 연료탱크는 스틸 재질의 80L 용량으로, 리턴(return)방식의 연료펌프를 장착하고 있다.

연료탱크 내부의 유량변화에 따른 소음특성변화를 살펴보기 위해서 연료탱크 자체의 모드해석을 실시한 결과는 Fig.4와 Table3과 같다.

각 유량에 따른 모드해석 결과 중 관심을 가질 수 있는 주파수와 위치를 나타낸 것이며 유량별 관심주파수를 Table3과 같이 선정하였다.

선정 기준은 연료 탱크 모드 해석에서 얻어진 결과에서 나타난 굽힘모드와 연료펌프의 주파수범위에서 결정하였고, 연료펌프의 하모닉성분의 영향도 반영하였다.

연료 탱크의 모드 해석을 통해 연료탱크에서의 유량별로 소음에 영향을 줄 수 있는 주요 모드를 확인할 수 있었으며 연료펌프의 영향을 받을 수 있는 모드의 주파수도 확인할 수 있었다.

Table 3 Vibration frequency analysis of fuel tank

유량/Hz	주파수 (Hz)							
empty	40	60	81.25	88.75	95	118.8	132.5	148.8
	163.8	182.5	195	236.2	245	272.5	290	
20L	60	92.5	118.8	145	207.5	216.2	231.2	237.5
	251.2	295						
30L	47.5	60	78.75	81.25	87.5	92.5	100	112.3
	125	142.5	148.8	157.5	162.5	180	208.8	221.2
	227.5	230	251.2	265	276.2	295		
40L	60	78.75	91.25	97.5	105	108.8	115	123.8
	140	147.5	151.2	156.2	170	180	200	210
	222.5	231.2	237.5	247.5	253.8	262.5	275	283.8
50L	12.5	60	76.25	81.25	93.75	97.5	103.8	106.2
	123.8	142.5	148.8	158.8	161.2	173.8	176.2	182.5
	186.2	190	197.5	200	220	226.2	233.8	247.5

Fig.4 (a)는 30L유량에서 연료탱크의 IPI(Input Point Inertance) 시험 결과이며, (b)는 연료탱크의 민감 주파수에 대한 ODS(Operating Deform Shape) 분석 결과이다. A구간은 65.1Hz의 1차 굽힘모드이고, B구간은 113.3Hz의 2차 굽힘모드이다.

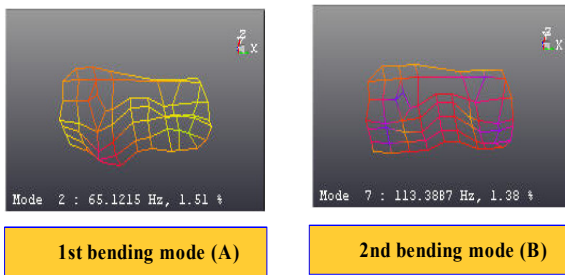
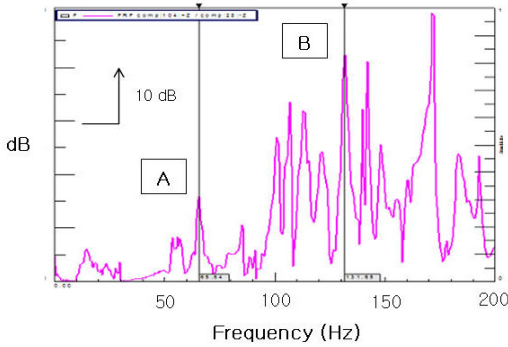


Fig.4 Fuel tank mode shape (30L)

Fig.5는 연료펌프의 저주파 영역의 오더성분을 분석한 결과 1/2차 및 1차 오더성분과 공진이 발생하는 주파수와 겹치는 것을 보여주고 있다. 특히 공진이 일어나는 주파수는 Fig.4에서 보여준 1,2차 굽힘 모드와 일치하는 것을 확인하였다. 이로써 연료펌프의 작동 시 발생하는 소음 중에서 구조전달소음과 관련한 저주파 소음은 연료펌프의 차수와 관련이 있으며, 특히 1/2차와 1차 오더 성분이 연료탱크와 공진을 일으키면서 발생하는 것으로 추정된다.

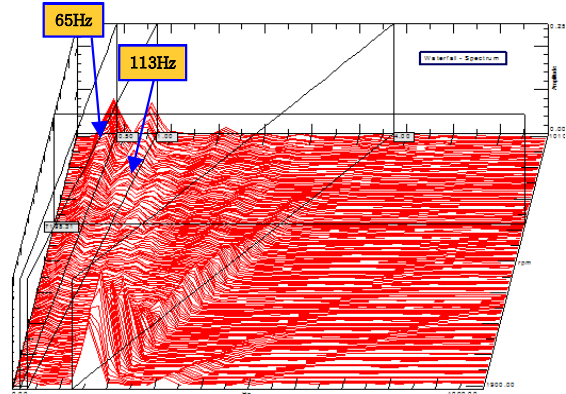


Fig.5 Low frequency waterfall data of fuel pump

3.2 연료펌프 장착 및 가동시험

연료탱크만의 모드해석결과와 더불어서 탱크내부에 연료펌프가 장착되어 연료를 송출할 때의 특성을 측정하였고, 연료펌프 어셈블리를 연료탱크에 체결하고 13.5V의 전압과 유효 압력을 주어 실차에서의 조건과 동일하게 구성하여 시험하였다.

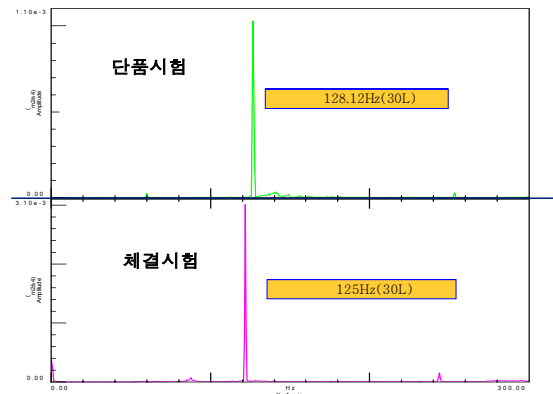


Fig.6 Fuel pump vibration comparison data

Fig.6에서와 같이 연료탱크에서 연료펌프의 진동 값의 변화를 살펴보면 단품시험과의 주파수 변화를 알 수 있다. Table4는 연료펌프 단품과 탱크체결 시 유량별 비교 이다.

Table4 Fuel pump vibration comparison data

	유량 변화에 따른 단품시험결과		연료탱크 체결 시 유량 별 시험결과	
	1차 주파수	2차 주파수	1차 주파수	2차 주파수
10L	126,25	6681,25	122,5	6492,5
20L	127,5	6750,62	118,8	6296,4
30L	128,12	6790,62	125,0	6625,0
40L	128,12	6790,88	123,8	6561,4
50L	128,75	6813,12	123,8	6561,4

유량별 연료탱크 체결 시 시험결과 유량이 증가함에 따라 주파수도 변화하다가 30L이상이 되었을 때 일정한 값을 유지함을 알 수 있다.

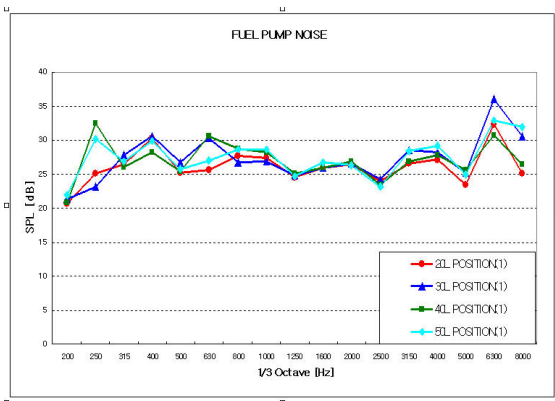


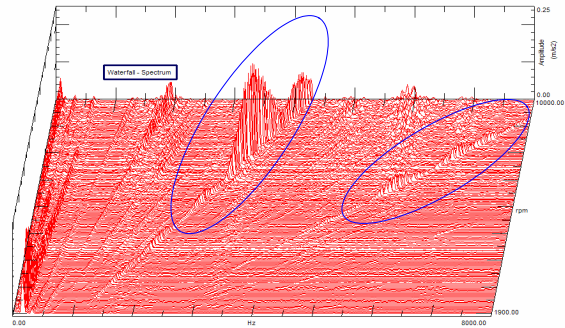
Fig.7 Fuel pump noise in fuel tank

20L~50L의 유량 변화에 따른 연료탱크에서 발생하는 소음을 연료펌프 상향 10cm위치에서 측정하였다. 그 결과 Fig.7과 같이 30L이상의 유량에서는 차이를 구분할 만한 소음의 변화가 나타나지 않음을 확인 하였다. 시험의 반복성을 유지하기 위하여 본 연구에서는 30L에서의 유량을 기준으로 시험하였다.

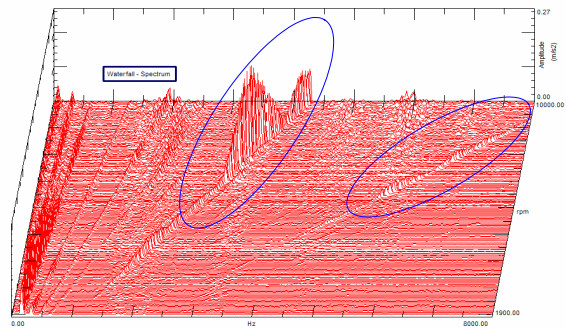
3.3 연료탱크 장착 시 연료펌프의 차수분석

Fig.8의 Waterfall spectrum data는 연료탱크에 체

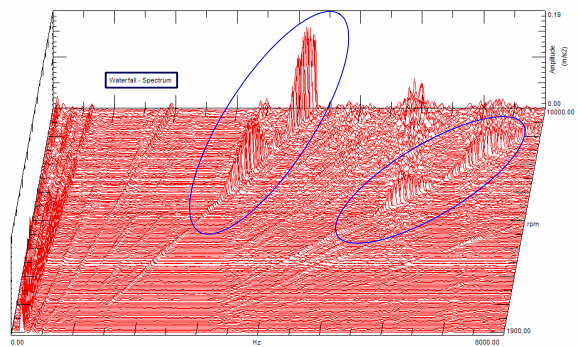
결 시 30L 유량에서 0V부터 20V까지 Sweep하여 얻은 연료펌프 진동 차수분석 결과이다. 이때 측정 위치는 연료펌프 상단 플레이트 중심이며 3축가속도계를 사용하였다.



(a) x-axis



(b) y-axis



(c) z-axis

Fig.8 Waterfall plot of Fuel Pump vibration

x축 Data를 확인하여 연료펌프 장착 시 1300HZ~2500HZ 구간에 해당하는 6500~8500rpm 영역에서

의 24차 성분이 크게 존재하는 것을 확인하였다. y축에서도 x축 방향과 유사한 경향을 볼 수 있고 z축에서는 24차 성분이 2900~3500Hz영역에 해당되는 6600~8800rpm에서 스펙트럼 증폭 구간이 확인되며, 그 이상의 회전 영역은 정상 회전 영역과 벗어나는 구간이므로 크게 고려하지 않았다. 53차 성분에서는 5500~6400Hz 영역의 6447~7300rpm구간이 비교적 큰 진폭이 나타났다. 진동스펙트럼 분석을 통해 연료펌프에서의 차수성분과 회전수에 관련된 데이터를 확보하였다.

4. 실차 진동 및 소음 평가

본 연구에서 고려한 차량은 국내 중 대형세단으로, 차량 소유자가 뒷좌석에 탑승하는 경우가 대부분이라 할 수 있는 차종이다. 이는 차량의 소유자가 일반적인 다른 차종에 비해서 연료펌프 및 연료탱크에서 발생하는 진동소음 현상이 더욱 예민하게 인지될 수 있다고 볼 수 있기 때문이다.

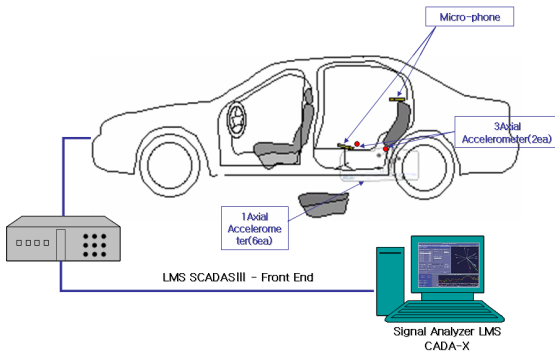


Fig.9 Schematic diagram for the measurement of Fuel pump system noise & vibration

Fig.9는 연료 펌프의 위치와 실차에서의 진동 소음 전달 경로를 파악하기 위한 진동 및 소음 측정 위치를 나타낸다. 실내 소음 측정을 위해서 차량 후석에서 소음 값을 측정하면서 연료펌프의 주파수 특성과의 연계성을 파악하였다. 또한 차량 외부에서는 창문이 열려있을 때 들리는 경우에 대한 것이 주를 이루므로 이를 고려한 실외 소음 특성을 파악하였다.

Fig.11은 실차 시험으로 측정된 연료펌프의 진동 스펙트럼과 실내 후석의 시트 탈거 후 플로어 위치

에서 측정된 진동 스펙트럼을 비교한 것이다.

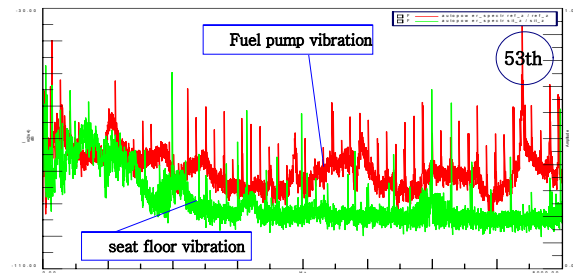


Fig.11 Fuel pump and the interior vibration measurement in the vehicle

실차 장착 후 연료펌프의 주파수 변화는 Table5와 같이 1차주파수는 어셈블리 상태보다 약 10Hz정도 높아진 것을 확인할 수 있다. BPF역시 실차상태에서 약700Hz의 변화가 있음을 확인 되었다.

Table5 Fuel pump test result in the vehicle

	1차 주파수 (dB)	BPF (dB)
#1	138.75(28.62)	7368.12(16.32)
#2	138.75(27.29)	7345.62(17.44)
#3	138.75(27.29)	7345.62(17.44)
#4	139.38(35.62)	7398.75(16.77)
#5	140.62(30.62)	7435.00(17.70)
#6	141.25(35.99)	7503.12(14.33)
#7	141.88(34.54)	7546.25(16.96)
#8	140.62(28.65)	7445.62(14.65)
#9	140.00(35.95)	7415.62(20.31)
#10	138.75(36.51)	7381.25(14.67)

5. 결론

연료공급 장치의 진동 특성에 대해서 연료 펌프 단품에서 어셈블리로, 어셈블리에서 실차로 장착되어지는 과정에 따른 특성변화를 파악하고 연료 탱크의 유량에 따른 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 연료펌프 단품에서 어셈블리로 체결하면 1차 주파수는 약 20Hz, BPF는 약 1000Hz 내외의 변화가 있음을 확인 하였다. 마찬가지로 연료펌프 어셈블리를 연료탱크에 장착하면 1차 주파수는 약 10Hz, BPF는 약 700Hz 내외로 상승하였다.

- 2)연료탱크 내부의 유량 변화에 따라서 굽힘진동 특성이 변화되다가, 30L 이상이 되면 일정하게 유지됨을 확인하였다.
- 3)모드해석 결과 65.12Hz에서 1차 굽힘모드가 나타났고, 113.3Hz에서 2차 굽힘모드를 확인 하였고 연료펌프의 저주파 영역의 오더성분을 분석한 결과 1/2차와 1차 오더성분이 1,2차 굽힘모드와 정확히 일치하는 주파수에서 높은 진폭이 있음을 확인하였다. 이로써 연료탱크 공진이 연료펌프의 차수 성분과 관계되면서 저 주파 소음을 유발하는 것으로 분석되었다.
- 4)연료펌프의 차수분석 결과 24차 성분과 53차 성분이 크게 나타나 이는 소음에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다.
- 5)본 논문에서는 150Hz 전 후 저주파 영역에 대하여 연료펌프의 가진 주파수 대비 연료탱크의 공진 주파수의 모드중첩으로 인한 차량진동 특성에 대한 현상을 실험적으로 정리하였다. 향후 과제로는 연료펌프 및 연료탱크의 차량 소음 특성에 대한 기여도 분석을 위하여 방사소음 해석에 대한 연구가 필요하다.

(7) 강태식의 1인, “질량법칙을 이용한 연료펌프 특성을 저감 방법”, 한국자동차공학회 2004년도 추계학술대회 , pp.759~763

(8) 강태식, “자동차 연료펌프 날개깃 모양에 따른 소음변화의 실험적 연구”, 한국자동차공학회 2006년도 추계학술대회 , pp.1773~1778

참 고 문 헌

- (1) Victor R. Lake, “Noise Measurements of Electric In-Tank Fuel Pumps”, SAE870982
- (2) 우메무라 코지의 2인, “탱크 내부 액체의 음장 해석에 의한 연료펌프의 작동음 연구”, 일본자동차기술회 1990년
- (3) 나병철외 2인, “누설특성을 고려한 GDI 엔진용 연료펌프의 고압생성 증진에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, 24권6호, 2000, pp.785~791
- (4) 박성호외 4인, “연료탱크의 슬로싱 진동 및 소음에 관한 모델링 및 해석”, 한국자동차공학회 1998년도 춘계학술대회, pp.563~568
- (5) 박기진의 1인, ‘배플을 적용한 액체연료탱크 내의 슬로싱 억제기법 연구’, 한국소음진동공학회 2003년 춘계학술대회, pp.917~920
- (6) 심재기의 1인, “연료펌프 진동검사 프로그램 개발”, 한국자동차공학회 2003년도 추계학술대회 , pp.768~773