

대형 승용차량용 연료펌프의 소음특성에 대한 실험적 고찰

사종성⁺, 강태원*

(논문접수일 2011. 07. 04, 심사완료일 2011. 07. 14)

An Experimental Study on Noise Characteristics of Fuel Pump System

Jongsung Sa⁺, Taewon Kang*

Abstract

The comfort and quietness of vehicle has been improved greatly due to the development of technology in automobile industry. Some of noise reductions, for example, are driven by the improvement in the power-train system. Due to better in all performance, it is required to reduce more noise in automobile components. One of them is related to the fuel pump system including a pump and a tank. 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 provide knowledge to reduce the level of noise and vibration in fuel pump system.

Key Words : Fuel pump(연료펌프), Fuel pump assembly(연료펌프 어셈블리), Fuel tank(연료탱크), Order analysis(차수분석)

1. 서론

자동차의 기술발전과 성능향상으로 인하여 차량의 정숙성이 개선되면서 과거에는 크게 문제되지 않았던 진동소음현상들이 새롭게 나타나고 있다. 이 중의 하나가 연료펌프(fuel pump)를 포함한 연료공급장치에서 발생하는 소음이라 할 수 있다⁽¹⁾. 특히 편안한 승차감과 함께 뛰어난 정숙성이 요구되는 대형 승용차량은 타 차종에 비해서 뒷좌석의 탑승빈도가 높고, 대용량의 연료탱크를 탑재하므로, 유체이동으로 인한 불규칙적인 운동이 연료 펌프와 연결되어 원하지 않는 소음으로 발생할 수 있는 내재적인 문제점을 가지고 있다. 따라서 연료공급 장치는 단순히 구성 부품만의 품질이 우수하여야 하는 것 뿐만 아니라 전체 시스템적으로 높은 퀄리티를 유지하여야 하는 엄격한 요구조

건을 갖는다. 가솔린엔진의 연료공급장치는 연료펌프와 연료탱크, 연료레일(fuel rail), 연료분사장치(injector) 및 증발가스포집장치(canister) 등으로 구성된다. 이 중에서 연료펌프는

가솔린엔진의 분사장치에 공급되는 연료를 유효한 압력으로 송출하는 핵심부품이며, 전기모터에 의해서 구동되는 터빈방식의 임펠러가 내부에 장착되어 있다.

연료펌프를 포함한 연료공급장치에 대한 소음 연구는 크게 유체이동으로 인한 해석적인 방법과 구성 부품에 대한 실험적인 방법을 중심으로 연구되어 왔다. 연료 탱크내의 유체이동과 관련한 연구로는 소음측정기법, 연료탱크 내부 액체(연료)에 의한 음향해석, 연료펌프 자체의 고압생성이나 탱크 내부 슬로싱(sloshing)현상 및 격막(baffle) 등에 대한 연구들이 진행된 바 있다⁽¹⁻⁵⁾.

* 국민대학교 기계시스템공학부 (jirehk@kookmin.ac.kr)
주소: 136-702 서울시 성북구 정릉동 861-1
+ 서일대학 자동차과

한편, 주요 부품에 대한 연구로는 연료펌프의 진동검사기법과 부가질량, 임펠러 형상 등에 대한 연구⁽⁶⁻⁸⁾와 함께, 최근 가솔린 직접분사(GDI, gasoline direct injection)방식의 엔진체택에 따른 고압연료시스템과 디젤엔진의 연료흐름에 관한 연구⁽⁹⁻¹⁰⁾도 발표된 바 있다.

이러한 연구들을 살펴보면 연료공급장치를 구성하는 주요 부품에만 집중했을 뿐, 실제 차량의 적용사례나 엔진가동 단계의 소음현상에 대한 연구사례는 적었다고 판단된다.

본 연구에서는 연료공급장치의 대표적인 부품인 연료펌프, 연료펌프 어셈블리(assembly) 및 연료탱크 내부의 체결단계에 따른 연료펌프의 특성변화를 파악한 후, 이를 실차에 적용시켰을 때 발생하는 소음현상을 분석하였으며, 실차 상태에서의 소음 저감을 유도할 수 있는 단품 상태의 연료펌프에 대해서 연구하였다.

2. 연료펌프

2.1 연료공급장치의 구성

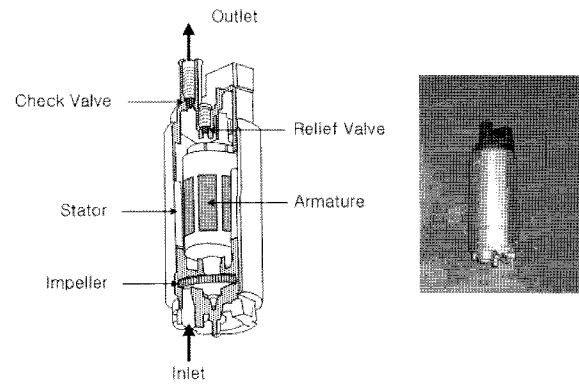
연료공급장치는 Fig. 1과 같이 연료펌프, 연료펌프 어셈블리 및 연료탱크 등으로 구성된다. 연료펌프의 내부 구조는 Fig. 1(a)와 같이 회전자(armature)와 고정자(stator)로 이루어진 구동모터와 임펠러(impeller) 등으로 구성된다. 또한 연료펌프는 Fig. 1(b)와 같이 연료필터, 연료송출 파이프, 리턴 및 석션(suction) 파이프 등과 함께 조립되는데, 이를 연료펌프 어셈블리(assembly)라 한다. 결국 연료펌프 어셈블리는 Fig. 1(c)에서 보는 것처럼 연료탱크 내부에 장착되어 연료에 잠기게 된다.

대형 승용차량은 Fig. 1(c)와 같이 대용량의 연료담재를 위해서 양쪽으로 저장 공간이 분리된 양장형 방식의 연료탱크를 채택하며, 연료펌프가 장착되지 않은 다른 쪽에 위치한 연료는 연료탱크로 복귀(return)하는 연료의 흡입압력(suction pressure)을 이용하여 이동시킨다.

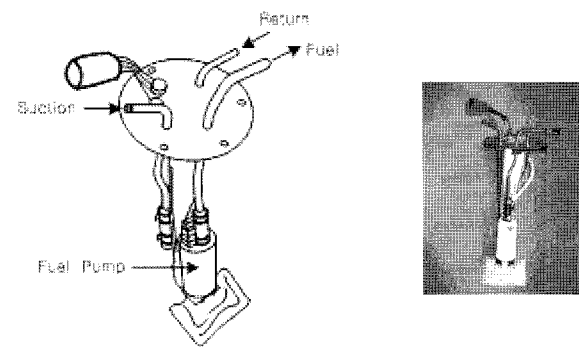
이러한 연료공급장치의 주요 부품들은 시동키의 조작에 의해 연료가 엔진에 공급되는 순간부터 차량의 소음특성에 영향을 줄 가능성을 가지고 있다. 예를 들면, 장시간 주차 후의 연료라인 가압과정(Key ON 후 약 3초간), 구동모터의 기본 회전수, 임펠러의 날개숫자, 연료탱크의 고유 진동수 등이 실차 운전 시 초기 소음 특성에 영향을 줄 수 있는 인자들이다.

2.2 연료펌프의 특성

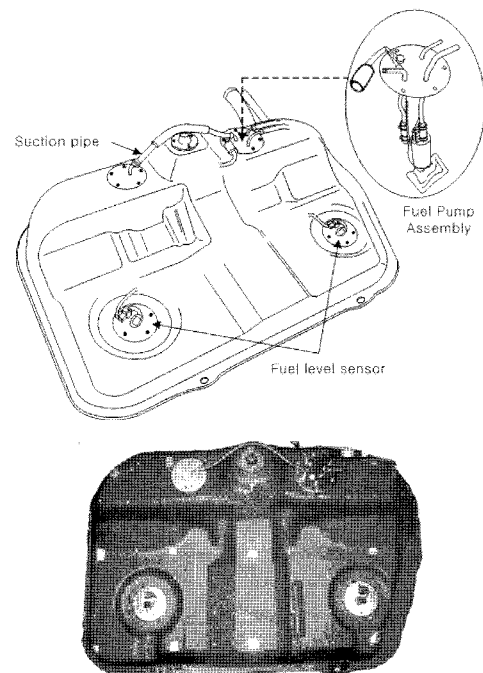
연료공급장치의 작동과정에서 유발되는 소음현상을 파악하기 위한 방법 중의 하나는 구성부품들을 순차적으로 결합하는 각 단계의 진동특성을 파악하는 것이다. 즉, 단품상태의 연료펌프, 연료펌프 어셈블리, 연료탱크 내부에 최종 장착된 경우처럼 단순 부품에서 실제 차량의 적용조건과 같이 체결구조를 변화



(a) Cross sectional view of the fuel pump



(b) Fuel pump assembly

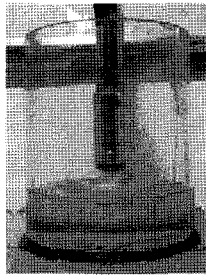


(c) Fuel pump assembly and fuel tank

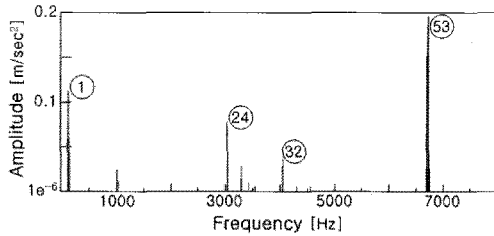
Fig. 1 Fuel pump, fuel pump assembly and fuel tank

시키면서 진동특성을 단계적으로 파악하는 것이다.

가장 기본적인 구성요소인 연료펌프 단품만의 진동특성을 Fig. 2(a)와 같이 측정된 결과, 연료펌프의 내부 부품특성으로



(a) Vibration test of the fuel pump



(b) Vibration test result of the fuel pump

Fig. 2 Vibration characteristics of the fuel pump

인하여 다양한 차수(order)의 진동현상을 나타내는데, 이는 연료펌프 임펠러의 날개 깃, 구동모터의 정류자, 연료펌프 회전수와와의 관계 때문이다⁽⁸⁾.

연료펌프만의 진동측정은 실차장착 시의 유효전압(13.5V)을 적용하였다. 연료펌프 작동에 의한 연료의 송출만이 이루어진 진동특성은 Fig. 2(b)와 같고, 원 안의 숫자는 연료펌프의 회전을 기준한 차수를 나타낸다. 연료펌프만의 가동에서는 1차, 24차, 53차 성분에 해당되는 진동특성이 지배적으로 나타나고 있다. 이 중에서 24차 성분은 정류자로, 53차 성분은 임펠러 날개 깃(53개)으로 인해 나타나는 진동특성이다.

1차 성분은 구조전달소음(structure borne noise), 53차 성분(이하 고차성분)은 공기전달소음(air borne noise)으로 연료펌프에서 발생하는 소음에 가장 많은 영향을 끼치게 된다. 특히 고차성분은 1차 성분의 저주파 성분과 달리 인체의 청각기관에게 매우 민감한 주파수 영역이므로 탑승자의 불만사항이 발생할 소지가 높다.

2.3 연료펌프 어셈블리의 진동특성

연료펌프는 Fig. 1(b)와 같이 연료펌프 어셈블리에 장착되어 연료의 송출과 복귀(return) 파이프 및 안장형 연료탱크의 연료 흡입파이프(suction pipe) 등으로 구성된다. 이러한 연료펌프의 체결조건 및 연료송출과 복귀라인의 추가로 말미암은 연료펌프의 진동특성을 10개의 샘플을 통해 측정하였다. 각 샘플마다 동일한 유효전압을 적용하여 측정한 결과는 Table 1과 같다.

양산 라인에서 QC를 통과한 10개의 단품과 어셈블리 상태의 연료펌프 진동 주파수를 측정하였다. 특히, 1차수와 고차성분의 값을 각각 측정하여 t- test 분석하여 본 결과, 유의수준

Table 1 Test results of order analysis for fuel pump and fuel pump assembly(unit : Hz)

Sample No.	Fuel pump only		Fuel pump assembly	
	1st order	High order	1st order	High order
1	123.1	6519.4	124.4	6593.8
2	121.9	6587.5	127.5	6745.6
3	122.5	6596.2	124.4	6585.6
4	129.4	6860.6	131.9	6960.0
5	131.2	6927.5	131.3	6980.0
6	130.0	6882.5	125.6	6668.9
7	130.0	6895.0	131.3	6933.1
8	126.2	6680.6	128.8	6835.1
9	130.6	6915.6	131.8	6990.6
10	131.9	6983.7	130.0	6888.1
Avg.	127.7	6784.9	128.7	6818.1

0.05에서 두 그룹의 1차 성분 주파수($p=0.26$)와 고차성분의 주파수($p=0.34$)는 서로 상이하지 않음을 확인하였다. 즉, 연료펌프 단품의 주파수 특성이 어셈블리 상태의 주파수 특성과 서로 상이하지 않을 가능성이 매우 높으며, 이는 연료펌프 단품상태에서의 진동특성이 우수할 지라도 어셈블리 상태보다는 실차에서 그 특성을 달리할 수 있다는 것을 추정하게 한다. 따라서 본 연구의 목적처럼, 지금까지 수행해온 단품 상태의 연료펌프 시험의 결과에 좀 더 효과적이며 실질적인 진동 특성을 파악하기 위해서는 실차 시험까지 연계되는 진동 특성 파악이 중요하다.

특히, 다양한 배기량의 엔진에 대해서도 동일한 연료펌프를 사용하는 경우가 많은 국내 차량에서는 더욱 세심한 관리가 이루어져야 하겠다. 본 연구에서는 연료펌프 체결조건에 따른 진동수의 변화가 비교적 적은 5번 샘플의 연료펌프를 선정하여 연료탱크 및 실차실험을 진행하였다.

3. 연료탱크의 특성

비록 연료펌프 단품의 진동 특성과 어셈블리 상태의 진동 특성차이가 미미하더라도 어셈블리를 연료 탱크에 장착하는 순간 또 다른 진동특성을 보일 가능성이 높다.

연료펌프 어셈블리는 Fig. 1(c)와 같이 최종적으로 연료탱크 내부에 장착되며, 대형 승용차량에서는 후방 승객석의 착석부위 차체 아래쪽에 연료탱크가 위치한다. 연료탱크의 선행연구에서는 탱크 내부의 연료량에 따라서 소음특성이 변화되는 것으로 보고⁽²⁾된 바 있으므로, 본 연구에서도 연료탱크 내부의 연료량 변화에 따른 소음측정을 실시하였다.

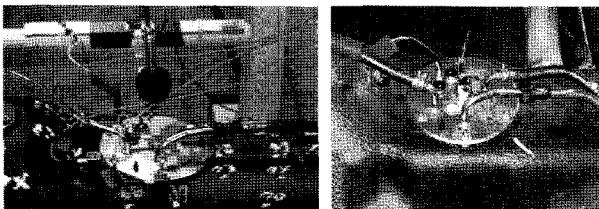
Fig. 3(a)와 같이 연료량을 20리터에서 50리터까지 10리터 단위로 변화시키면서 연료탱크 상부 10cm 위치에서 소음을 측정된 결과는 Fig. 3(b)와 같다.

연료량 변화에 의한 연료펌프의 소음특성은 주파수 영역에 따라 순위가 조금씩 변화되고 있으며, 특히 1차 주파수 영역과 6,000Hz 이상의 고차성분 영역에서는 소음특성이 두드러지게 발생하고 있다. 따라서 구조진동의 특성이 문제로 예상되는 1차 주파수 영역과 harmonics 성분이 문제로 예상되는 고차성분 영역의 주파수 특성을 동시에 파악하기 위하여, 연료펌프의 공급전압을 0V에서 15V까지 증가시켜 연료펌프의 회전수를 변화시키는 차수분석(order analysis)을 실시하였으며, 또한 30리터의 연료량을 기준으로 연료탱크의 모드시험과 실차시험을 진행하였다. 이때 연료탱크 내부에 장착된 연료펌프는 연료에 잠기게 되므로 Fig. 3(a)와 같이 연료펌프 어셈블리 상단 플레이트의 진동특성을 측정된 결과는 Fig. 4와 같다. 여기서 x, y, z 축은 각각 차량의 진행방향, 좌우 및 상하방향을 의미한다.

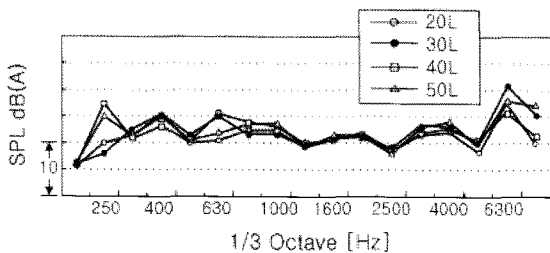
측정결과를 살펴보면 연료펌프의 1차 성분에 비해서 고차성분은 x, y, z 축 별로 연료펌프의 회전수 변화에 따라서 상이한 피크 값을 갖는 것을 알 수 있다. 특히, x 축의 경우에는 저주파수 영역에서 주로 구조진동의 특성이 강하지만, y 축의 경우에는 중, 고주파수 영역에서도 구조진동의 영향이 있음을 보여주고 있으며, z 축의 경우에는 고주파수 영역에서 구조진동특성을 볼 수 있다.

이는 연료펌프 제조업체의 품질검사에서 주로 실시하는 한 방향(y 축)만의 진동측정으로는 정확한 품질관리가 힘들다는 점을 시사하며, Table 1의 결과로도 입증된다 할 수 있다.

또한 연료탱크의 모드시험(modal testing)에서도 연료량 30리터를 기준으로 실시한 결과, Fig. 5와 같이 65.1Hz, 113.4Hz 영역에서 연료탱크 자체의 굽힘진동현상이 발생함을 확인하였다.



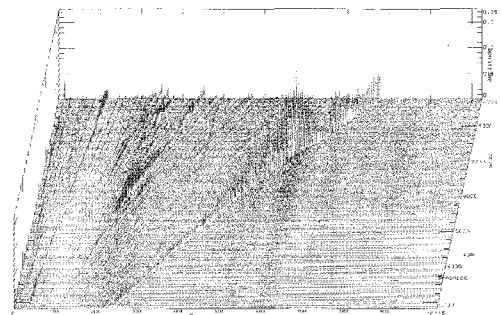
(a) Noise and vibration test of the fuel tank



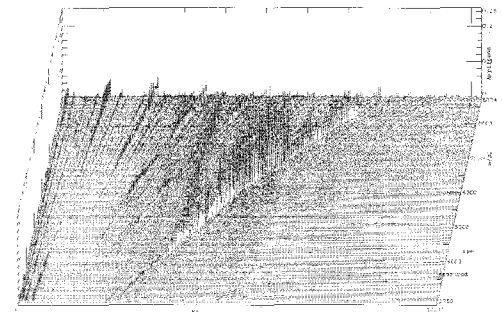
(b) Comparison of noise level with fuel amount in tank

Fig. 3 Noise test and result of the fuel tank

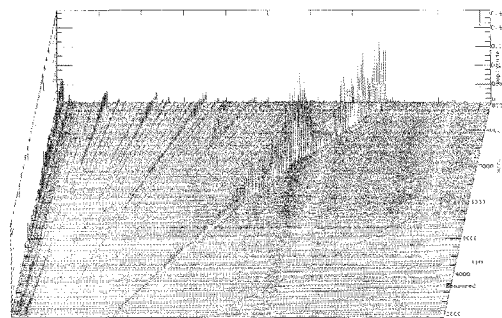
연료펌프의 회전수가 7,200rpm 내외임을 감안할 때, 연료펌프 회전수의 0.5차 및 1차 성분의 가진(加振) 진동수(각각 60, 120Hz 내외)가 연료탱크의 굽힘 진동수에 근접해 있다고 볼 수 있다. 이는 연료펌프의 품질관리가 미비하였거나, 알터네이터(alternator)의 공급전압이 불안정하여 연료펌프의 회전수변화를 유발할 경우, 연료탱크의 강제 진동현상이 증폭되어 낮은 주파수의 불쾌한 소음을 발생시킬 우려가 있음을 시사한다.



(a) x axis

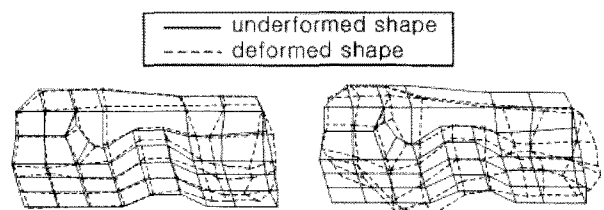


(b) y axis



(c) z axis

Fig. 4 Vibration characteristics of order analysis in fuel tank



(a) 65.1Hz

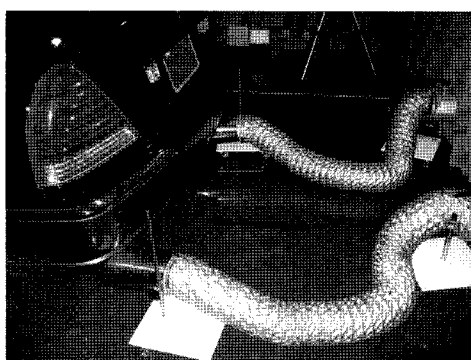
(b) 113.4Hz

Fig. 5 Bending mode shape of the fuel tank(30L)

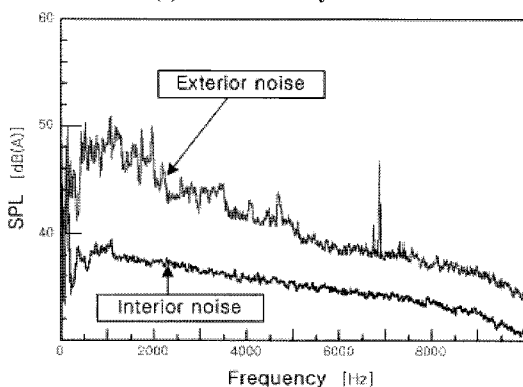
4. 실차적용 및 평가

지금까지 고려한 연료펌프와 연료탱크를 실차에 직접 적용하여 연료펌프 어셈블리의 진동특성, 뒷좌석 중앙 귀 위치의 실내 소음과 차량 외부의 실외소음을 측정하였다. 측정조건은 공회전상태로 실차 반 무향실에서 진행하였으며 Fig. 6(a)과 같이 배기소음의 영향을 최소화시켰다. 특히 실외소음은 연료펌프의 장착위치에 가까운 왼쪽 뒷바퀴 후방 50cm 위치에서 측정하였다.

실제 차량시험에서는 연료펌프의 단품시험에 비해서 다소 증가된 진동수(1차 140Hz, 고차 6,900Hz 내외)를 나타냈다. 이는 엔진가동에 따른 실제 연료의 소모 및 그에 따른 연료탱크로의 복귀(fuel return) 연료량 변화에 의한 원인이라 예측된다. 공회전 상태에서 측정한 실내소음에서는 Fig. 6(b)와 같이 연료펌프에 의한 소음이나 이음은 발생하지 않았으나, 실외소음에서는 고차성분에 해당되는 소음(6,900Hz)이 지배적으로 발생함을 알 수 있다. 이는 차체의 밀폐(sealing)처리 및 흡차음재료의 효과로 인하여 차량실내로 연료펌프의 소음이 전달되지 않았다고 판단된다. 하지만, 창문을 여는 경우나 차체의 흡차음처리가 미흡할 경우에는 고차성분의 날카로운 소음이 실내로 유입되어 불편감을 유발시킬 것으로 예상된다.



(a) Ventilation system



(b) Comparison of sound pressure level with interior and exterior noise

Fig. 6 Ventilation system and test result

5. 결론

대형 승용차량에 적용되는 연료펌프, 연료펌프 어셈블리, 연료탱크 등의 진동소음특성을 순차적으로 파악한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 연료펌프의 가동으로 인하여 임펠러의 회전 날개 깃과 정류자 등의 영향으로 다양한 차수의 진동현상이 발생하며, 연료펌프의 체결단계에 따라 그 특성이 조금씩 변화됨을 확인할 수 있었다. 특히, 연료 펌프 단품과 연료펌프 어셈블리 상태의 진동 특성은 큰 차이를 보여주지 않지만, 차수 분석 결과, x, y, z 축의 진동 특성이 서로 다른 주파수 영역에서 문제를 일으킬 가능성이 존재하기 때문에, 단품상태에서도 x, y, z 축을 모두 고려한 좀 더 세심한 품질관리 기준이 필요하다.
- (2) 연료펌프 작동과정에서 연료탱크 내부의 연료량에 따라서 소음특성이 다소 변화됨을 확인하였다. 또한 대형 승용차량 연료탱크의 고유 진동수와 연료펌프의 가진 진동수가 근접해있어서 연료펌프의 회전수 변화가 있을 경우에는 낮은 주파수의 소음이 발생할 수 있다.
- (3) 실차시험을 통해서 연료펌프 가동에 따른 고차성분의 실외소음을 확인하였으며, 차체의 밀폐나 흡차음 처리가 미흡할 경우에는 높은 주파수의 소음이 실내로 유입될 수 있음을 확인하였다. 따라서 높은 주파수로 인한 문제 가능성을 제거하기 위해서는 연료펌프 자체의 가진 주파수를 조절하거나 임펠러의 특성변경에 대한 연구가 추가적으로 필요하다.

후 기

본 논문은 2011년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음.

참 고 문 헌

- (1) Victor, R. L., 1987, "Noise Measurement of Electric In-Tank Fuel Pumps," *SAE*, 870982, pp. 255~269.
- (2) Kouji, U., Yoshifumi, I., and Hidekuni, S., 1990, "Study on Impeller Noise of In-Tank Fuel Pump," *JSAE 902202*, pp. 413~416.
- (3) Na, B. C., Kim, B. S., and Choi, S. W., 2000, "A Study on Pressure Increment of GDI Fuel Pump Considering Leakage Flows," *KSME*, Vol. 24, No. 6, pp. 785~791.
- (4) Park, S. H., Song, J. S., Lee, J. C., Ko, B. S., and Kim, S. W., 1998, "Modeling and Analysis of Sloshing

- Vibration and Noise at Fuel Tanks,” *Proceedings of KSAE*, pp. 563~568.
- (5) Park, K. J., and Woon, S. H., 2003, “Sloshing Minimization Technique in Liquid Fuel Tank by the use of Baffle,” *Proceedings of KSNVE*, pp. 917~920.
- (6) Sim, J. G., and Kang, T. S., 2003, “Development of Fuel Pump Vibration Examine Equipment,” *Proceedings of KSAE*, pp. 768~773.
- (7) Kang, T. S., and Sim, J. G., 2004, “Particular Noise Reduction Method used to Mass Law,” *Proceedings of KSNVE*, pp. 759~763.
- (8) Kang, T. S., 2006, “Vehicle Noise Experiment According Impeller Type of Fuel Pump,” *Proceedings of KSAE*, pp. 1773~1778.
- (9) Lim, B. S., Ahn, S. J., Kim, J. H., and Kang, K. T., 2010, “NVH Development of the High Pressure Fuel System for GDI Engines,” *Proceedings of KSAE*, pp. 468~474.
- (10) Son, J. H., Lee, H. Y., Kim, D. J., Kim, J. H., and Han, C. W., 2011, “Flow Analysis of Fuel Pump in Diesel Automobile with Numerical Simulation,” *Proceedings of KSMTE*, pp. 276~277.