

자동차엔진용 고압연료 공급 파이프의 고유진동수 해석 및 진동시험

Natural Frequency Analysis and Modal Test of Fuel Pipe for Vehicle Engine

손인수^{1*}, 허상범², 안성진²

In-Soo Son^{1*}, Sang-Bum Hur², Sung-Jin Ahn²

〈Abstract〉

The purpose of this study is to obtain the natural frequency of fuel supply pipes for vehicle engines through modal analysis and testing and compare the resulting values to ensure the reliability of the analysis. In other words, in this study, we obtain the unique frequency of the fuel pipe of the vehicle engine through analysis and testing and compare its results.

Comparing the natural frequency obtained through analysis and testing, the first and third vibration modes obtained accurate natural frequency results of less than 1% and very similar results of less than 5% maximum error over the fourth vibration modes. These results are determined that if design changes of fuel pipes are made depending on the vehicle in the future, there will be no problem in obtaining the natural frequency of pipes that have been changed by analysis. Through future analysis and testing, durability and stability evaluation of connections of fuel supply pipes for vehicle engines will be carried out.

Keywords : Modal Analysis, Modal Test, High Pressure Fuel pipe, Natural frequency, Vehicle Engine

1* 정회원, 교신저자, 동의대학교 기계자동차로봇부품공학부 1* Corresponding Author, Division of Mechanical, Automobile, Robot Component Engineering, Dong-eui University.
E-mail: isson92@deu.ac.kr

2 피에이치에이(주) E-mail: sjahn@phakr.com

2 PHA Co., LTD

1. 서론

커먼레일 엔진은 정밀 전자제어가 가능한 압축 장치(압축 어큐뮬레이터, 레일)와 응답성이 뛰어난 연료 분사장치를 이용하여 운전상태에 맞게 연료를 분사해주는 엔진이다. 이러한 엔진에서 연료 펌프에서 커먼레일로 고압의 연료를 공급하는 파이프로 연결되어 있으며, 이 연료공급용 파이프의 경우 엔진 진동 등에 의하여 연결부분에 피로파괴가 발생할 우려가 있다. 따라서 차량 엔진용 연료 공급 파이프의 고정위치, 형상 및 길이에 따른 고유진동 특성을 파악하여 공진회피 설계 등 다양한 개선 대책이 필요한 실정이다. 자동차 엔진은 다양한 소음진동의 발생, 복잡한 전달경로 및 공진현상 등의 총체적인 특성을 갖고 있기 때문에 엔진에 연결되는 연료공급 파이프의 진동특성을 파악하는 것은 공학적으로 매우 중요하다고 할 수 있다.

자동차용 연료공급 장치의 진동특성을 분석하여 이를 실차에 적용시켰을 때 발생하는 소음 진동현상을 분석하여 진동저감을 피하고자 하는 연구가 진행되었다[1,2]. 다용도 복합 규격의 자동차 연료 공급 PVC HOSE의 생산성을 향상 시킬 수 있는 권선장치를 개발하기 위한 연구결과[3]도 발표되었으며, 하이브리드 자동차용 가솔린엔진 연료공

급에 대한 특성에 대한 연구도 진행되었다[4]. 최근 엔진용 연료공급 파이프의 진동시험을 위한 지그가 파이프의 진동특성에 영향을 미치지 않게 설계 되었는지 여부를 검토하고, 연료공급 파이프 자체만으로 진동해석을 하는 경우와 시험용 지그와 결합된 경우 파이프의 고유진동수 결과를 비교하는 연구결과도 발표되어 지고 있다[5].

이 연구의 목적은 유한요소를 이용한 모달해석(modal analysis)과 시험을 통하여 연료공급 파이프의 고유진동수를 구하고 그 결과 값을 비교하여 해석의 신뢰성을 확보하는 것이다. 따라서 시험 및 해석에 있어 실제 차량의 주행 환경보다는 고정된 시험환경에서 고유진동수 파악을 수행하였다. 즉, 향후 개발 차량에 따라 연료공급 파이프의 설계변경이 이루어지는 경우 시험이 아닌 해석을 통하여 연료공급 파이프의 고유 진동특성을 예측하기 위한 것이다.

2. 연료공급용 파이프의 고유진동수 해석

이 장에서는 유한요소해석 상용프로그램인 Ansys WB(2019)를 이용하여 Fig. 2에 보인 연료 공급용 파이프의 모달해석을 수행하고자 한다. 기존 연구에서 연료공급 파이프의 시험지그 선정을 위한 고

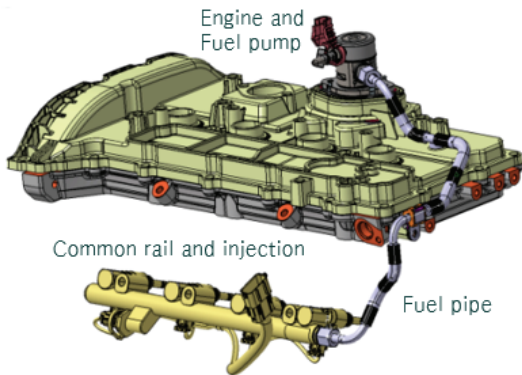


Fig. 1 Analysis model

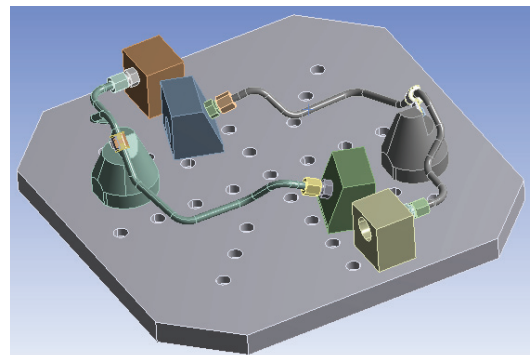


Fig. 2 Analysis 3D model

유진동수 해석을 수행한 결과와 고유진동수 값은 동일함을 우선 밝힌다.

Table 1은 해석모델의 기계적 물성치를 도시하였으며, Fig. 3은 연료공급 파이프의 유한요소 모델을 나타내고 있다. 해석을 위한 노드수는 378,171개, 요소수는 171,979개로 하여 해석을

Table 1. Material property

Item	Material	Elastic modulus (GPa)	Yield strength (MPa)
Fuel pipe	Duplex S32304	200	450
Nut	SWCH45K	200	690
Bracket	SPCC	190	160
Test Jig	Aluminum Alloy	71	110

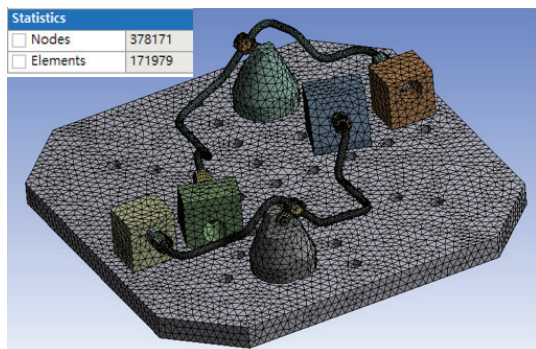


Fig. 3 FE modeling for analysis

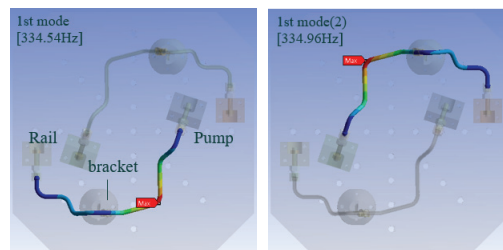
Tabular Data		
	Mode	Frequency [Hz]
1	1.	334.54
2	2.	334.96
3	3.	716.09
4	4.	716.52
5	5.	807.9
6	6.	809.35
7	7.	917.55
8	8.	920.09

Fig. 4 Natural frequency of pipe for analysis

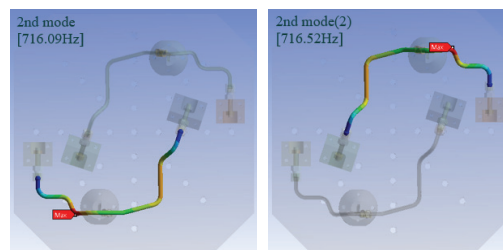
수행하였다.

Fig. 4는 해석을 통하여 얻은 연료공급 파이프의 고유진동수 결과를 나타낸 것이다. Fig. 2의 모델을 통하여 쉽게 예측할 수 있는 것처럼 고유진동수는 서로 쌍으로 나타나며 진동모드가 클수록 두 값의 차이가 조금씩 커지는 경향을 보이고 있으나 그 차이는 무시할만한 크기라고 판단된다. 이후 진동시험을 통하여 얻은 결과와 비교를 위해서 각 쌍의 고유진동수를 하나의 진동모드라고 가정하였으며, 두 값의 평균값을 이용하였다. 즉, 1차 모드(해석결과 1, 2차 모드) 고유진동수는 약 334.75 Hz, 2차 모드(해석결과 3, 4차 모드)는 716.31 Hz, 그리고 3차 모드(해석결과 5, 6차 모드)에서는 약 808.63 Hz의 고유진동수를 보인다.

Fig. 5는 연료공급 파이프의 최저차 2개 쌍의 고유 진동 모드형상을 도시하고 있으며, 1차 모드의 경우 브라켓을 중심으로 펌프측 파이프 부분에서 최대 변형이 발생하며, 2차 모드의 경우 레일측 파이프에서 최대 변형이 발생한다는 것을 알 수 있다.



(a) first mode



(b) second mode

Fig. 5 Analysis result(vibration mode shape)

3. 진동시험

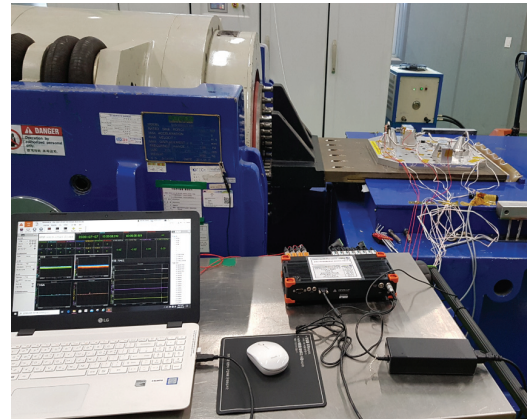
앞에서 해석을 통하여 얻은 연료공급 파이프의 고유진동수의 신뢰성을 확보하기 위하여 진동시험을 수행하였다. 진동시험에 있어 가진 장비는 FAMTECH사의 EDS16000LS 및 TBT 1200M, 600M 모델을 사용하였으며, 가속도계는 Dytran (3035B1G, 3023A)을 사용하였다.

Table 2와 Fig. 6에 시험장비 및 시험셋팅과 가진방향을 도시하였다. z축 방향이 상하운동이며, x, y축 가진이 좌우방향으로 하여 진동시험을 진행하였다.

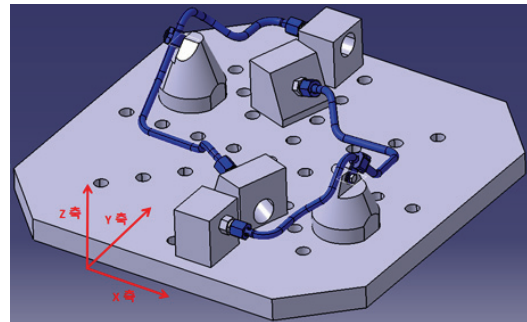
Fig. 7은 가속도 센서의 부착위치를 나타낸 것으로 펌프측, 파이프, 브라켓측과 브라켓, 그리고 레일측에 각각 5개의 센서를 부착하였으며 총 10개의 가속도 센서를 사용하여 데이터를 획득하였다.

Fig. 8은 시험에서 적용한 가진(하중)조건을 그

래프로 표현한 것이며, 0~1,500 Hz 주파수 영역에 대하여 최대 400 g의 하중조건을 반복, 부여




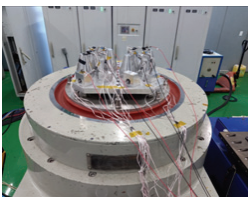

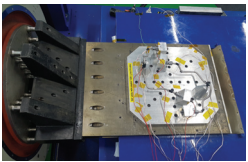
(a) test setup



(b) excitation direction

Fig. 6 Test setup and excitation direction

Table 2. Test equipment specifications

	Equipment specifications	Test image
z	 FAMTECH (EDS16000LS)	
	z 축방향(상하운동) - Max. acceleration : 100g - Frequency range : 2,100Hz	
x, y	 (TBT 1200M / 600M)	
	1) 정규 슬립베드 : 427kg, 2,000Hz, 37g 2) 소형 슬립베드 : 267kg, 2,000Hz, 60g Accelerometer : Dytran(3035B1G, 3023A)	

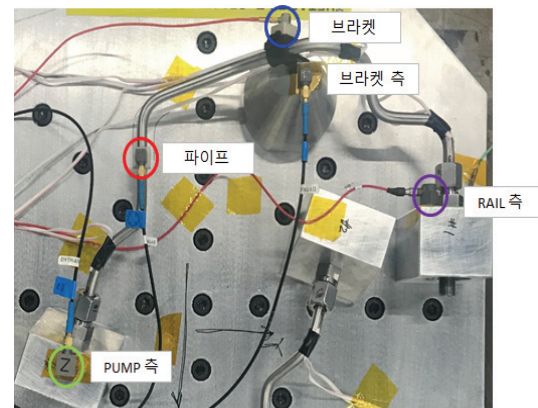


Fig. 7 Sensor position for modal test

하여 시험을 수행하였다. 적용한 하중조건은 자동차 업체에서 제시한 진동시험 조건이다.

Fig. 9는 연료공급 파이프의 진동시험 결과를

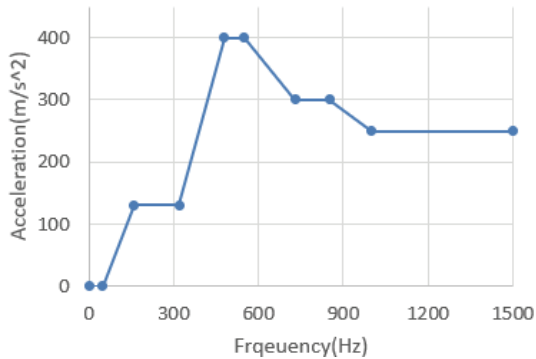


Fig. 8 Analysis result(vibration mode shape)

Table 3. Modal test results

Mode No.	Natural frequency(Hz)		Error(%)
	Test	Analysis	
1	334.47	334.75	0.08
2	764.16	716.31	6.26
3	815.43	808.63	0.83
4	966.80	918.82	4.96

나타낸 것이다. 3차 모드 진동수의 경우 z축 가진에서 얻은 그래프에서는 미소하게 피크치를 보이고 있으나 x축 가진의 경우 명확하게 피크치를 보이고 있음을 알 수 있다. 각 방향에 대한 고유진동수를 정리하여 Table 3에 각 진동 모드에 대한 고유진동수를 도시하였다. 여기서 오차는 다음 식 (1)을 이용하여 구하였다.

$$\text{Error} = \left| \frac{\text{Test} - \text{Analysis}}{\text{Test}} \right| \times 100(\%) \quad (1)$$

해석 및 시험을 통하여 얻은 파이프의 고유진동수를 비교한 결과 1, 3차 진동 모드는 1% 미만의 매우 정확한 고유진동수 결과를 얻었으며, 4차 모드에 걸쳐 최대 오차 5% 미만의 매우 유사한 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결론

이 연구에서는 차량엔진의 연료공급 파이프의

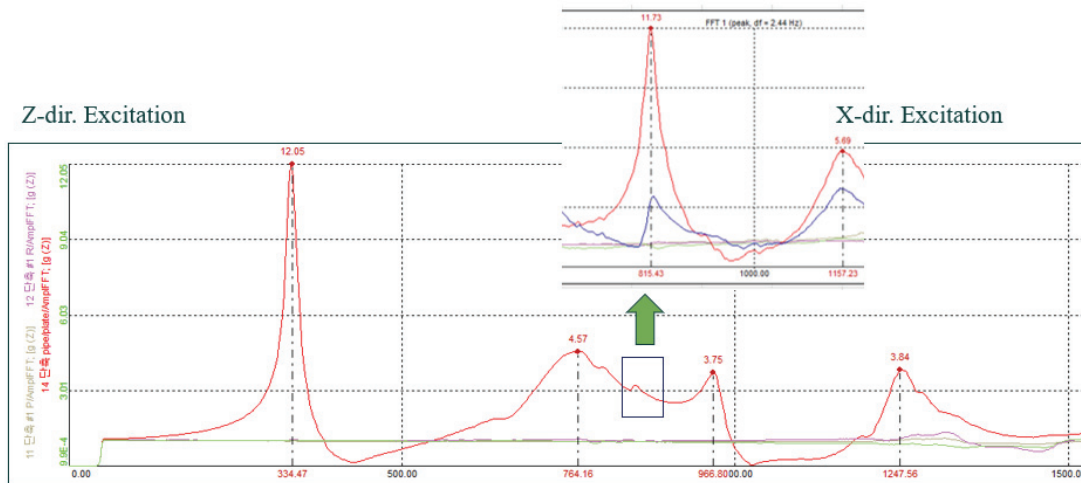


Fig. 9 Test results for z and x direction excitation

고유진동수를 해석 및 시험을 통하여 구하고 그 결과를 비교하였다. 해석으로 구한 파이프의 고유진동수와 시험을 통하여 얻은 고유진동수는 5 % 미만의 오차를 가지며 매우 신뢰성이 높다는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 향후 차량에 따라 연료공급 파이프의 설계변경이 이루어지는 경우 해석으로 설계변경된 파이프의 고유진동수를 획득 하여도 문제가 없을 것이라 판단된다.

향후 해석 및 시험을 통하여 차량엔진용 연료공급 파이프의 연결부 파단 또는 파괴에 대한 내구성 및 안정성 평가를 수행할 예정이다.

참고문헌

[1] Kwon, J. Kim, C. Kang, T. Sa, J. and Kang, T., "A Study on the Characteristics of Vibration in Fuel Pump System", Proceeding of KSNVE

Conference, pp. 494-500, (2007).

- [2] Kim, B. J., Won, H. I., Lee, S. W., Park, S. J. and Chung, J., "A Study on the Vibration Reduction of an Automobile Fuel Pump", Transactions of the KSNVE, Vol. 23, No. 6, pp. 520-526, (2013).
- [3] Jung, J. W., Kim, B. S. and Cheon, J. U., "Development of Tube Winding System for Vehicle Fuel Supply", Proceeding of KSPE Conference, pp. 407-408, (2012).
- [4] Lee, S. I., Lee, S. W. and Park, S. Y., "Study on the Performance Characteristics for the Gasoline Engine of Hybrid Automotive", Proceeding of KAIS Conference, pp. 539-542, (2009).
- [5] Son, I. S. and Kim, M. S., "Analysis of Vibration Characteristics of Fuel Pipe and Test Jig for Vehicle", Journal of Korean Society of Industry Convergence, Vol. 24, No. 3, pp. 315-322, (2021).

(접수: 2021.06.29. 수정: 2021.08.03. 게재확장: 2021.08.04.)