◎ 논 문

http://dx.doi.org/10.22680/kasa2020.12.3.027

Transfer Function Method를 이용한 자동차 연료탱크의 진동 피로 해석에 대한 연구

안상호*

Vibration Fatigue Analysis of Automotive Fuel Tank Using Transfer Function Method

Sang Ho Ahn*

Key Words : Virtual durability analysis(가상 내구 해석), Vibration fatigue analysis(진동 피로 해석), Frequency response analysis(주파수 응답해석), Automobile fuel tank(자동차 연료탱크)

ABSTRACT

In this paper, the process of predicting efficient durability performance for vibration durability test of automobile parts using vibration test load on automobile fuel tank is presented. First of all, the common standard load that can be applied to the initial development process of the automobile was used for the fuel tank and the vulnerability of the fuel tank to the vibration fatigue load was identified through frequency response analysis. In addition, the vulnerability of the fuel tank was re-enacted through vibration durability test results, and the scale factor was applied to the standard load. In order to predict the vibration durability performance required for detailed design, vibration fatigue analysis was performed on the developed vehicle with the frequency of vibration severity equivalent to the durability test, and the vulnerability and life span of the fuel tank were identified through the process of applying weights to these selected standard loads, thereby reducing the test time of the development vehicle.

1. 서 론

차량 개발 시간을 단축시키고 수명 요구도를 달성하기 위하여 혹독한 단품 및 차량 수명평가 시험을 수행해야 하며, 개발 리스크를 포함한 많은 시간과 비용이 발생된다. 해석 및 평가기술이 발전함에 따라 개발 초/중기 단계에서 내구성능을 예측하기 위해 가상 내구해석(virtual durability analysis)을 이용한다[1]. 고객의 다양한 요구사항에 대응하여 빠른 개발주기는 제조사의 경쟁력으로 이어지고 있으며, 단축되는 차량개발 기한을 만족하기 위해 진동내구 해석으로 초기 개발 차량을 검증해야 한다. 진동 내구해석 방법은 과도 응답 해석과 주파수 응답 해석, 파워 스펙트럼 밀도 해석을 이용한다.

각 진동내구시험 조건에 따라 그에 적합한 해석방법이 개발단계에 맞추어 설정되어야 한다. 특히 연료계통, 전장계통, 방열/방진판 등의 단순 지지구조 또는 외팔보 구조의 부품들은 주행 중 입력 하중의 주파수와 반응하여 공진 발생 가능성이 높기 때문에 동적 특성을 고려한 내구해석 방법을 적용한다. 차량 개발주기는 점점 빨리지고 있으며, 짧은 차량개발 기간동안 진동내구에 의한 내구성 문제는 항상 제기되고 있는 실정이다. 차량 제조사는 개별적 신뢰성 있는 진동내구 성능예측 방법의 설정하고 해석과 시험을 연계한 표준화 과정을 지속적으로 개발/관

* 신한대학교 기계자동차융합공학과, 교수
E-mail : drshahn@naver.com

논문접수일: 2020.5.4, 논문수정일: 2020.8.13, 게재확정일: 2020.8.27

리하고 있으나 국내의 개발 성숙도는 그리 높지 않은 실정이다.

이와 관련된 국내외 연구로 Na 외[2]는 구성요소의 데이터 획득부터 입력 프로파일의 도출에 이르기까지 차량 구성요소에 대한 다축 진동 피로 시험을 위한 신호 처리 방법을 제시하였다. Cho 외[3]는 동력전달 장치인 추진축이 차량 주행 중 상하운동 하중에 의한 내구성에 대한 강도 해석을 수행하여 구속 조건 하에 Harmonic response 해석에서의 최대 변위를 조건을 발생하는 진동수를 예측하였다. Baussaron 외[4]는 설계의 견고성을 입증하기 위해 불확실한 매개변수에 대한 응답 민감도를 결정하는 혁신적인 방법을 개발하여 가장 영향력 있는 매개변수의 식별을 통해 모달 분석(고유진동수, 모드 형상), 무작위 진동 계산 및 손상 계산을 위한 결과 분포를 제시하였다. Han과 Cho[5]는 브레이크 시스템에서 두 종류의 브레이크 패드 모델을 구조 및 피로 분석을 수행하여 피로 손상에 대한 예방과 내구성을 예측하였다. Lee와 Cho[6]는 ATV 차량의 전면에 부착되는 범퍼의 구조적인 형상에 따른 수명평가를 피로해석을 토대로 진동과 같이 반복적인 하중 조건에 노출되는 범퍼의 특성을 파악하며, 여러 가지 피로상황에서 발생되는 크랙의 위치를 사전에 파악하였다. Kim[7]은 가속과 변형에 의한 피로 손상 비교를 분석하여 멀티 스펙트럼 입력 패턴에 대한 피로 손상의 최선의 선택을 결정하고 지상 차량 시스템의 피로 문제에 대해 여러 가지 손상 계산 방법을 제시하였다. Jung 외[8]는 많이 사용되는 4가지의 주파수영역 피로해석 방법을 선정하여, 시편 피로시험 결과를 토대로 Dirlik과 Benasciutti-Tovo방법과 유한요소모델을 이용하여 항공기 탑재 장비의 피로해석을 수행하였으며, 요구수명이 만족함을 확인하였다. Lim과 Shim[9]은 PSD를 활용한 배터리 커버의 진동 내구해석을 수행하여 차량 주행 동안에 발생하는 랜덤 진동에 대한 내구수명을 예측하였다. Hwang 외[10]는 피로 분석과 직결되는 응력 이력과의 상관계수를 이용하여 대표 하중을 선정하는 과정을 제시하였으며 이를 검증하기 위해 차량 동역학 해석으로 내구 주행 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 분석함으로써 대표 하중 선정에 대한 타당성을 입증하였다.

본 논문에서는 자동차 연료 탱크에 대한 진동 시험 하중을 이용하여 자동차 부품 진동 내구성 시험에 대한 효율적인 진동 내구성 성능 예측 과정을 제시한다. 초기 자동차 개발과정에서 적용할 수 있는 공통 표준하중을 이용하고 주파수 응답 분석 기법을 통해 진동 피로하중에 대한 연료탱크의 취약부를 확인한다. 진동 내구시험 결과를 통하여 자동차 연료탱크에 취약 부분을 재현하고, 표준하중에 스케일 계수를 적용하였다. 상세 설계 단계에 진입하기 위해 진동 내구성능을 예측해야 하며, 이때 내구시험과 동등 수준의 내구 가혹도를 발생시키는 진동수로 가진하여 개발차량 연료탱크에 대한 진동 피로해석을 수행한다.

2. Transfer Function Method를 이용한 진동 피로해석 이론

진동 피로해석을 이용한 수명 예측은 Fig. 1과 같이 일반적으로 진동계에 가해지는 가진력과 응답응력을 시간영역에서 분석하고 누적된 사이클을 입력하여 피로 수명을 예측하는 방법이다[1]. 불규칙 진동 환경에서 작동하는 부품에 대한 피로 손상 평가는 반응 응력 PSD(파워 스펙트럼 밀도) 함수의 통계 속성을 기반으로 하는 진동수 영역에서 진행되며 다양한 도로 표면 프로파일에서 작동하는 자동차 엔진과 같이 불규칙 하중 형식일 경우 피로 수명은 진동수 영역에서 평가한다. 진동수 기반한 피로는 하중 및 응답응력 및 변형 내역이 불규칙한 피로 수명의 평가를 참조하기 때문에 파워 스펙트럼 밀도(PSD 함수)와 같은 통계 수치를 사용할 때 가장 잘 나타낸다.

정적해석, 모드해석, 주파수 응답해석의 결과를 이용하고, 하중이력을 주파수 영역의 파워 스펙트럼 밀도 형

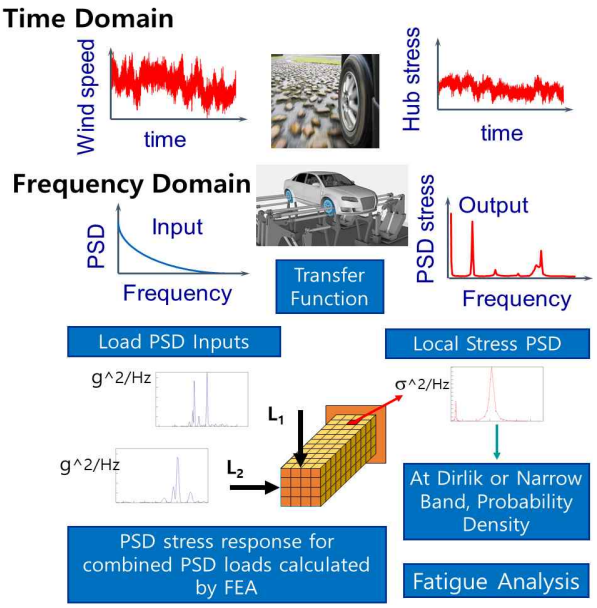

Fig. 1 Process of vibration fatigue analysis[1]

태로 입력하여 산출된 파워 스펙트럼 밀도를 이용하여 확률밀도함수로 변환시켜 피로수명을 산출한다.

2.1. 좁은 주파수 영역의 진동 피로해석

좁은 영역에서의 주파수 영역에서 응력진폭을 정의해야 하며 Miles[11]가 제시한 식은 다음과 같다.

$$\bar{D}^{NB} = \nu_0 C^{-1} (\sqrt{2m_0})^k \Gamma(1+\frac{k}{2}) \quad (1)$$

여기서 υ_0은 x축과 교차값, C와 k는 재료 피로 매개변수이다, m_0은 0번째 스펙트럴 모멘트, Γ()는 오일러 감마 함수로서 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma(z) = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (2)$$

2.2. 광대역 주파수 영역의 진동 피로해석

광대역 주파수 영역에서 진동 피로해석을 계산할 수 있는 Dirlik 방법[12]은 1985년에 제시되었으나 상용 진동해석에 널리 이용되고 있다. Rayleigh 확률 밀도 두 개와 지수를 서로 조합하고 사이클 진폭 분포를 근사화시킬 수 있다. Dirlik Method는 광대역 영역에서 Narrow Band 방식보다 우수함이 입증되었다. 식 (3)은 확률밀도 함수 p(s)로 m0, m1, m2, 및 m4 변수로 구성되어 있으며 PSD (power spectrum dendity)에서 계산되는 면적 모멘트를 계산할 수 있다.

$$p(S)_D = \frac{\frac{D_1}{Q} \cdot e^{\frac{-Z}{Q}} + \frac{D_2 \cdot Z}{R^2} \cdot e^{\frac{-Z^2}{2 \cdot R^2}} + D_3 \cdot Z \cdot e^{\frac{-Z^2}{2}}}{2 \cdot \sqrt{m_0}} \quad (3)$$

여기서 $z = \frac{S}{2 \cdot \sqrt{m_0}}$, $\gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 \cdot m_4}}$, $x_m = \frac{m_1}{m_0} \cdot \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}$,

$D_1 = \frac{2 \cdot (x_m - \gamma^2)}{1+\gamma^2}$, $D_2 = \frac{1-\gamma-D_1+D_1^2}{1-R}$, $D_3 = 1-D_1-D_2$,

$Q = \frac{1.25 \cdot (\gamma - D_3 - D_2 \cdot R)}{D_1}$, $R = \frac{\gamma - x_m - D_1^2}{1-\gamma-D_1+D_1^2}$

본 논문에서는 MSC.Nastran을 사용하여 파워 스펙트럼 밀도를 입력하여 주응력 대 주파수를 계산한다.

3. 차량 초기 개발을 위한 진동 피로 하중의 표준화

3.1. 자동차 연료탱크의 유한요소 모델

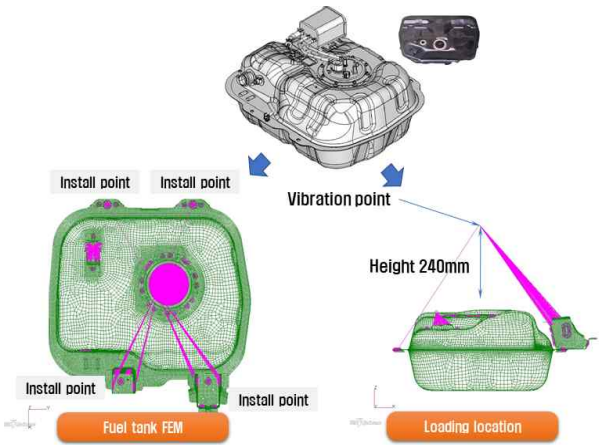

Fig. 2 Finite element model of automobile fuel tank calculating vibration fatigue

Fig. 2와 같이 연료탱크는 복잡한 곡면 형상에 상대적으로 얇은 두께를 가지고 있기 때문에 2차원 유한요소로 구성한다. 운행 중 발생하는 진동하중에 의한 정적 파괴와 공진에 대한 문제를 피로 측면에서 풀기 위해 연료 탱크 구조는 이전 모델의 시험하중 위치에 강체 연결요소(RBE3)를 사용하여 연료탱크 유한요소 모델에 연결한다. 상단부의 RBE 연결점에 이전 모델의 진동 시험하중을 입력하면 해석을 수행할 수 있다. 이전 모델의 해석 및 시험결과와 비교하여 취약부에 대한 재현성을 검토하고 각 차종별 계측 가속도 데이터를 분석하여 진동하중 표준화를 수행, 연료탱크의 내구수명을 계산한다.

3.2. 계측 데이터를 이용한 진동 하중의 표준화

Fig. 3과 같이 이전 개발 차량의 시험 데이터를 이용하여 x, y, z 방향 신호의 노이즈를 제거한다. 신호의 최대값과 최소값을 추출하여 개발 부품에 손상을 부여하는 주파수 영역을 선택할 수 있다. 차종에 따라 표준 신호를 적절히 확대 및 축소하는 과정을 거쳐 이전 모델에서 획득된 신호 데이터에 표준하중과 가중치 계수를 입력한다.

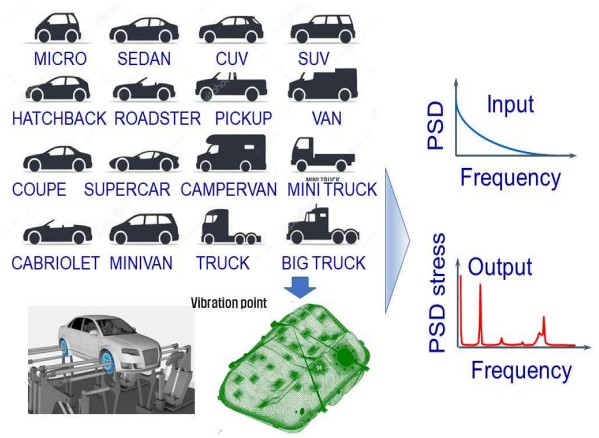

Fig. 3 Normalization precess of automobile conventional load for vibration fatigue

이를 개발 차량에 적용할 수 있는 표준하중으로 정의하여 차량 부품에 대한 설계와 성능을 입증할 수 있다. 이후 개발과정에 따라 입증시험 결과와 비교하여 설계의 수정을 판단한다. Fig. 4와 같이 진동 데이터의 표준화는 단위 가속도의 Power Spectrum Density와 이전 플래폼의 하중을 도입하여 손상을 많이 주는 주파수를 선정한다.

손상을 주는 주파수의 영역이 좁거나 넓기 때문에 주

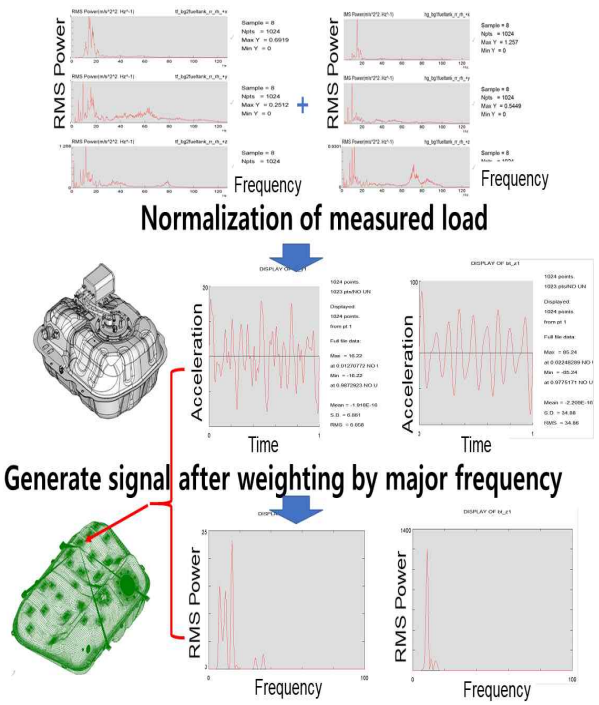

Fig. 4 Signal normalization of vibration development load data

파수 신호는 시험 데이터에 따라 10~20개를 선택한다. 상대적으로 넓은 고 주파수는 3~5Hz 단위로 구분하여 주파수와 RMS 값의 순서쌍으로 뽑는다. 각 신호를 연속된 사인 파형으로 생성하고 더하면. Fig. 4와 같이 RMS power와 주파수의 값으로 출력할 수 있다.

4. 자동차 연료탱크 구조의 진동 피로해석

4.1. 시험데이터를 이용한 차량 모델의 진동 피로해석

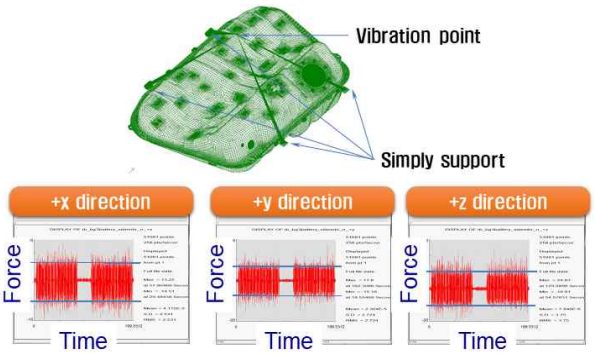

Fig. 5 Signal measurement data of vibration fatigue load

자동차 연료탱크에 입력되는 진동하중 지점은 Fig. 5와 같이 네 부분으로 나뉠 수 있다. 연료탱크 유한요소 모델에 RBE 요소를 적용하여 진동 하중을 입력할 수 있다. Fig. 5와 같이 연료 탱크에 입력되는 하중은 방향을 x, y, z축에 따라 신호를 구분하며, 이전 개발 모델에서 시험으로 획득한 시간이력에 따른 진동 하중을 진동하중 지점에 입력한다. 해석을 수행한 후, 연료 탱크를 장착하는 부위는 하중 이력을 추적하는 위치이다. 더불어 단순지지 고정점에 계측 위치의 신호를 추출한다.

계측 데이터를 활용한 진동하중의 표준화에서 가장 선행되어야 할 부분은 이전 개발 차량과 개발 차량에 동일한 진동 하중을 입력하여 가장 낮은 수명이 나오는 지점이 비슷한 위치에서 나오는지 여부이다. 본 논문에서는 MSC. Fatigue를 이용하여 진동 하중에 대한 내구 지수를 계산하여 내구 지수가 가장 크게 나오는 취약부를 산출하였다.

Fig. 6, 7, 8은 자동차 연료탱크 모델에 이전에 개발된 시험 차량의 신호를 입력하여 내구지수를 산출한 결과이다. 용접부의 내구 지수가 4.05, 지지 브라킷의 내구지수는 0.88, 플랜지의 내구지수는 0.46으로 계산되었으며, 4.2장에서 표준하중을 입력하여 개발 차량 연료 탱크와 낮은 수명과 동일한 취약 부위가 나오는지 확인한다.

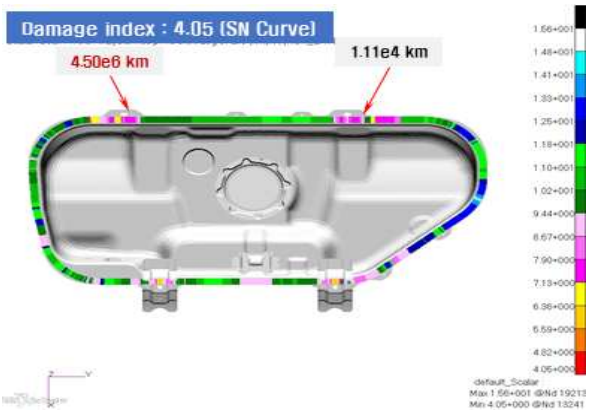

Fig. 6 Vibration fatigue results of welding part using test signal

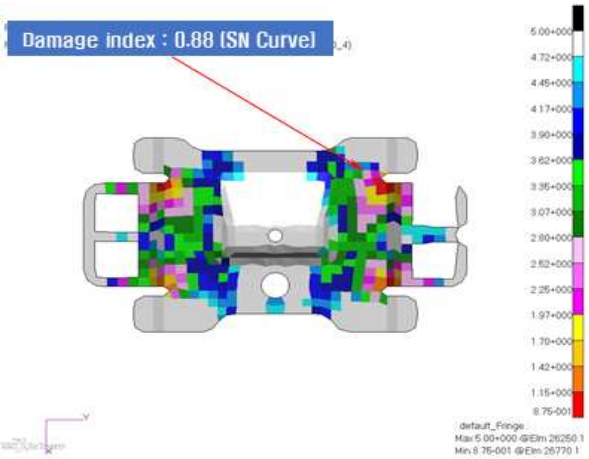

Fig. 7 Vibration fatigue results of canister bracket using test signal

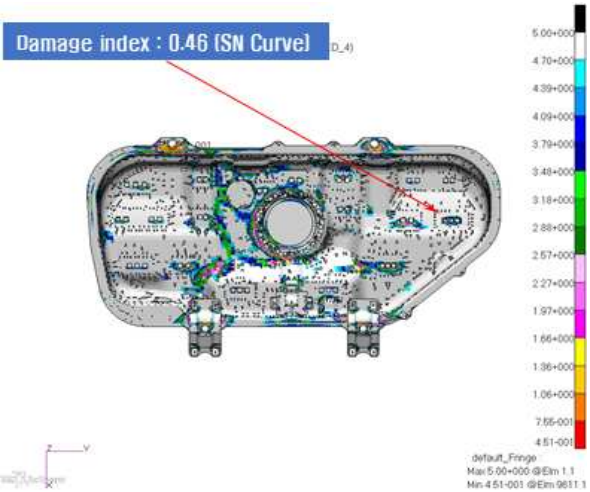

Fig. 8 Vibration fatigue results of baffle flange using test signal

4.2. 표준하중을 사용한 개발 차량의 연료탱크 진동 피로해석

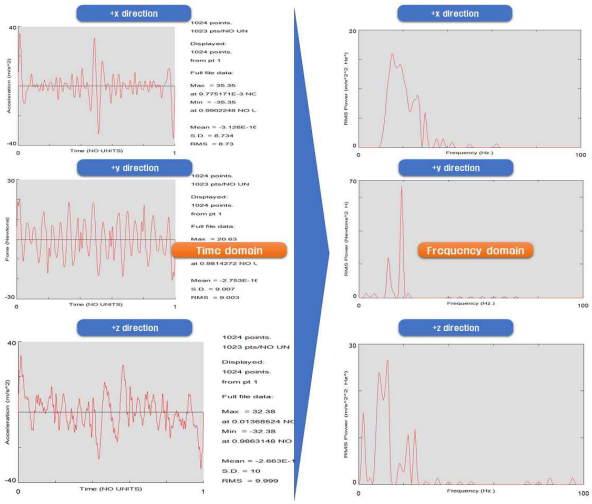

Fig. 9 PSD for measuring vibration load at test vehicle

Fig. 9는 연료탱크의 네 지점에 가속도계 센서를 부착하여 차량 진동에 대한 PSD(power spectrum density)를 계측한 값이다. 시간이력을 주파수 이력으로 바꾸어 표준 진동 하중 입력 데이터를 준비한다. 개발 차량의 등급별로 가중치를 적용하며, 본 절에서는 동급의 개발차량이지만 무게비를 선형적으로 계산하여 120%의 가중치를 적용한다.

Table 1에서 시험하중을 입력한 진동 피로해석 결과와 표준하중을 입력한 개발 차량 연료탱크의 진동 피로해석을 결과를 비교하였다. 연료탱크의 진동 피로입증시험에서 baffle flange에서 피로파괴가 발생한다. 표준하중과 가중치를 적용했을 때 동일한 위치에서 내구지수의 차이가 5% 이내일 때 표준하중을 입력한 해석결과의 사용 여부를 판단하였다. Fig. 10, 11, 12는 표준하중과 가중치를 적용한 진동 피로해석 결과이다. 시험하중을 입력했을 때와 동일한 취약부에서 내구지수가 계산되었다. 입력된 표준하중은 내구시험과 동일한 내구 가혹도를 발

Table 1 Damage index comparison at fuel tank component

Location	Analysis using test data	Analysis using scaled standard data
Welding part	4.05	6.57
Canister Bracket	0.88	1.8
Baffle flange	0.46	0.45

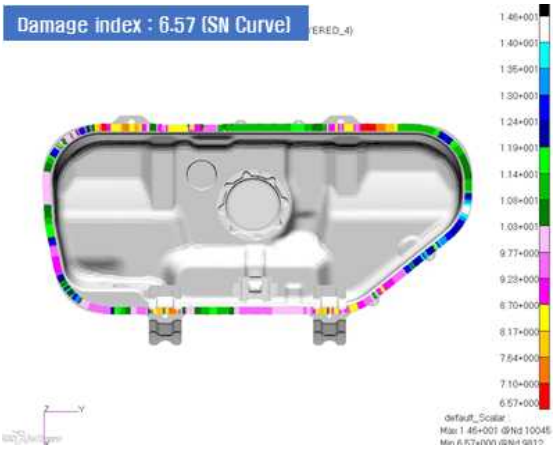

Fig. 10 Vibration fatigue results of welding part using standard normalizing signal

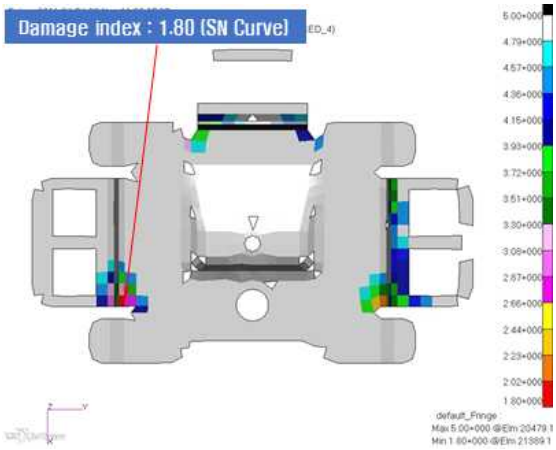

Fig. 11 Vibration fatigue results of canister bracket using standard normalizing signal

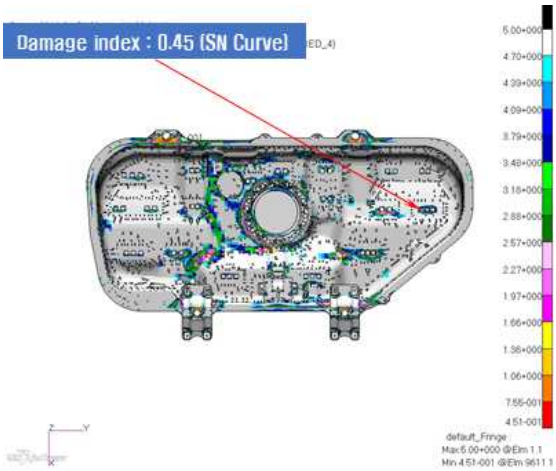

Fig. 12 Vibration fatigue results of baffle flange using standard normalizing signal

생시키는 진동수에 120%의 비율로 추가 가진하는 시험 조건이다. 표준하중이 적용된 개발 차량에서 내구지수는 welding part와 canister bracket에서는 수명이 감소하고 baffle flange은 동일 하단부에서는 2.2%의 수명이 감소한 결과가 나온 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 차량 연료탱크의 진동 내구시험에 연료탱크의 진동 하중이력을 표준화하여 진동 하중을 적용한 진동내구 성능 예측방법을 제시하였다.

제시된 진동 내구해석 과정을 통해 가중치가 적용된 표준 진동하중과 주파수 응답해석기법을 적용하여 개발차량 연료탱크의 취약부와 수명을 확인하였다. 선별된 하중에 가중치를 적용하면 개발차량에 시험시간과 비용을 절감할 수 있는 효과를 얻을 수 있다. 초기 차량 연료탱크의 설계를 확정한 이후, 정확한 내구성능 검증하기 위해 진동 피로파괴를 유발하는 진동수로 가진하면 개발차량에 대한 진동 피로해석을 검증할 수 있다.

후 기

본 논문은 2020년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

(1) S. H. Ahn, 2019, “A Study on Vibration Fatigue Analysis of Automotive Battery Supporter”, Journal of Auto-vehicle Safety Association, Vol. 11, No. 4, pp. 22~27.
DOI: http://dx.doi.org/10.22680/kasa2019.11.4.022

(2) C. B. Na, H. B. Lee, W. D. Lee, J. C. Kim, and Y. C. Bae, 2008, “Signal Processing for Multiaxial Vibration Fatigue Test on Vehicle Component”, Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 3, pp. 368~374.

(3) J.-U. Cho, S.-h. Kim, and K.-S. Kim, 2011, “A Study on Durability of Automotive Propeller Shaft by Fatigue and Vibration”, Korea Academy Industrial Cooperation Society, Vol. 12, No. 4, pp. 1495~1501.

(4) B. Julien, F. Bertrand, and Y., Thierry, 2013,

"Probabilistic random vibration fatigue", Phimeca Engineering, 34 rue de Sarlieve, pp. 522~529.

(5) M.S. Han and J.-U. Cho, 2014, "Durability Study through Structural and Fatigue Analyses of Brake Pads with Different Configurations", The Korean Society of Automotive Engineers, Vol. 22, No. 6, pp. 128~133.

(6) J.-H. Lee and J.-U. Cho, 2015, "Study on the Convergent Life Evaluation due to the Bumper Configuration of Multipurpose Vehicle", korea convergence society Vol. 6, No. 5, pp. 85~90.

(7) C.-J. Kim, 2015, "Damage Count Method Using Acceleration Response for Vibration Test Over Multi-spectral Loading Pattern", Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 25, No. 11, pp. 739~746.

(8) H. S. Jung, K. S. Kim, and S. W. Jung, 2017, "Fatigue Life Evaluation in Frequency Domain of aircraft Equipment Exposed to Random Vibration", The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Vol. 45, No. 8, pp. 627~638.

(9) H. S. Lee and P. R. Shim, 2018, "A Study on Vibration Fatigue Analysis of Electric Vehicle Battery Cover using PSD", The Korean Society Of Automotive Engineers, pp. 1015~1016.

(10) Y. G. Han, T.-Y. Kim, J.-Y. Kim, C.-Y. Rho, S.-Y. Kim, J. Samuel, and Y.-W. Suk, 2019, "Selection of Representative Load to Evaluate the Effects of Relative Damage on Vehicle Durability", The Korean Society of Mechanical Engineers, Vol. 43, No. 12, pp. 923~929.

(11) J. W. Miles, 1965, "On structural fatigue under random loading", Journal of Aeronaut Soc, Vol. 21, No. 7, pp. 53~62.

(12) T. Dirlik, 1985, "Application of computers in fatigue analysis. Ph.D. thesis", The University of Warwick.