

## 자동차 배터리 지지 구조의 진동 피로 해석에 대한 연구

안상호\*

A Study on Vibration Fatigue Analysis  
of Automotive Battery Supporter

Sang Ho Ahn\*

*Key Words* : *Virtual durability analysis*(가상 내구 해석), *Vibration fatigue analysis*(진동 피로 해석), *Frequency response analysis*(주파수 응답해석), *Battery supporter*(배터리 지지 구조)

## ABSTRACT

In this paper, the vibration load and analysis results for automotive battery supporter were performed to provide efficient vibration tolerance performance prediction methods for single-product vibration tolerance testing, and the major influencing factors and considerations for setting up single-unit vibration tolerance tests were reviewed. A common applicable standard load was applied to efficiently predict the performance of single-unit vibrations through the frequency response analysis technique. The results similar to test results can be predicted by checking vulnerable parts of the vehicle components for vibration loads and applying scale factor to standard loads. In addition, it was confirmed that the test conditions with a frequency generating the same durability severity as the endurance test are needed for accurate prediction of the durability of the single-unit vibration tolerance test conditions, and the acceleration and frequency with the conditions that there is no significant nonlinear phenomena in the vibration system are established during the single-unit vibration tolerance test conditions.

## 1. 서론

차량 개발 과정에서 내구성능을 만족하기 위하여 차량 수명평가 시험과 대상 수명평가 시험이 수행되고 있으며, 많은 시간과 비용이 발생된다. 해석 및 평가기술이 발전함에 따라 개발 초/중기 단계에서 내구성능을 예측하기 위해 가상 내구해석(virtual durability analysis)을 이용한다. 진동 내구해석 방법은 과도 응답 해석과 주파수 응답 해석, 파워 스펙트럼 밀도 해석을 이용하며, 각 진동내구시험 조건에 따라 그에 적합한 해석방법이 개발단계에 맞추어 설정되어야 한다.

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/관리하고 있으나 국내의 개발 성숙도는 그리 높지 않은 실정이다.

이와 관련된 국내외 연구로 한승호 외<sup>(1)</sup>는 자동차 차체 내 다점 스폿 용접 접합부의 누적 피로 손상에 따른 주파수 응답의 변화를 고려한 진동 피로 분석을 실시하였으며, 용접 접합부의 피로 수명은 전달 기능, 용접 접합부의 S-N 곡선과 입력 PSD를 결합하여 수명을 계산하였다. Baussaron 외<sup>(2)</sup>는 설계의 견고성을 연구하기 위해 불확실한 매개변수에 대한 모델 응답의 민감도를 결정하는 역

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

신적인 방법을 개발하여 가장 영향력 있는 매개변수의 식별을 통해 모달 분석(고유진동수, 모드 형상), 무작위 진동 계산(RMS 제약조건) 및 손상 계산을 위한 결과 분포를 결정하였다. Mršnik 외<sup>(3)</sup>는 자동차 산업에 전형적인 실제 실험과 관련하여 상이한 주파수 영역 방법을 비교하는데 초점을 맞추어 실험 비교에서는 단험 모드에 대한 저항, 증가된 배경 소음, 스펙트럼 폭의 영향 및 다중 진동 모드에 대한 영향을 연구하였다. Liu 외<sup>(4)</sup>는 무작위 진동 하중을 받는 볼 그리드 배열(BGA)의 유한요소(FE) 시뮬레이션과 피로수명 해석을 수행하여 PCB 조립체의 동적 특성 및 최적화 설계를 조사하고 BGA 솔더 조인트의 피로 수명을 예측하기 위한 가이드라인을 제시하였다. Ragab 외<sup>(5)</sup>는 수학적 모델링을 사용하여 알루미늄 서스펜션 컨트롤 암의 피로 특성을 결정하는 데 사용되는 피로 변형 강화 매개변수를 보다 세밀하게 구분하여 동일한 합금에 대한 동일한 분석 곡선과 비교하여 알루미늄 합금 A357의 표본에 대해 수행된 실험 곡선을 향한 피로 곡선의 개선을 보여주었다.

이명규 외<sup>(6)</sup>는 진동 피로 분석 기법을 통한 고 주파수 등 무작위 하중의 벨로우 피로수명 예측을 위해 유한 요소 모델을 구성하여 랜덤 하중을 가진 피로 해석을 수행하였다. 조병진 외<sup>(7)</sup>는 철도 차량의 핵심 요소인 철도 차량 주 변압기에 대한 유한 요소 분석을 실시하였다. 다양한 분석 기법을 적용하여 무작위 진동시 주 변압기의 구조적 무결성과 피로 내구성을 평가하였다. Kong 외<sup>(8)</sup>는 차량의 수직 진동 및 차량 서스펜션 시스템의 고유 진동수에 기초한 차량 코일 스프링의 피로 수명을 예측하기 위한 다중 선형 회귀(MLR) 기반 스프링 내구성 모델의 확립에 대해 논의하였다. 이 결과는 예측 값과 실험 값 사이의 양호한 일치도를 보여주며 자동차 코일 스프링의 피로 수명을 예측하는 데 있어 이들 모델의 적합성을 향상을 보여주었다. Ugras 외<sup>(9)</sup>는 차량에 대한 실시간 고주기 피로 추정 문제를 주파수 영역 방법을 적용하였으며 표준화 파워스펙트럼 밀도를 입력하여 주파수 영역에서 스펙트럼 모멘트 및 손상 강도를 계산하였고 제안된 접근방식은 피로 손상을 정확하게 예측할 수 있고 적재 조건을 실시간으로 추적할 수 있음을 보여주었다.

본 논문에서는 자동차 배터리 지지 구조의 진동내구해석 기법을 적용하고 주파수 응답 해석 결과와 PSD(Power Spectral Density) 형태의 입력 하중 조건을 적용한 동적 특성에 의한 피로 손상을 예측하는 Random vibration 내구해석과 고유진동 해석의 모드 응력 및 과도 응답 해석에서 모드 별 기여도를 중첩하여 동적 특성에 의한 피로

손상을 예측하는 Modal Superposition Method을 이용한 내구해석을 수행한다. 또한 개별적인 진동내구 시험에 효율적인 진동내구 성능예측방법을 제시하고, 개발 차량의 배터리지지 구조에 대한 진동 하중과 해석결과를 분석한다.

## 2. 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. 기술적으로는 구조에 대한 모드해석을 수행하여 응답특성을 파악하여 피로 해석을 수행하는 방법으로 구조해석의 고유모드와 주파수 응답해석을 먼저 수행한 후 하중이력을 주파수 영역의 파워 스펙트럼 밀도 형태로 입력하여 산출된 응답값(PSD)을 이용하여 확률밀도함수로 변환시켜 최종적으로는 대상구조물의 응력-수명 곡선으로부터 피로수명을 산출한다.

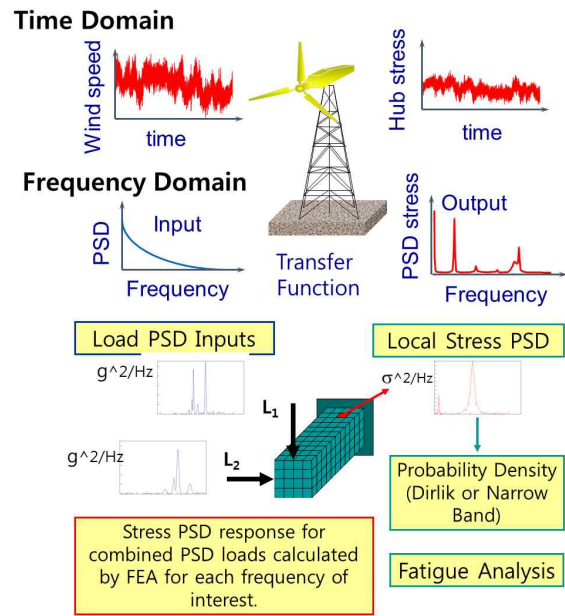


Fig. 1 Procedure of vibration fatigue evaluation

### 2.1. 협대역 주파수 영역의 진동 피로해석

협대역 주파수 영역의 진동해석은 1956년 Miles가 처음 제시했으며<sup>(10)</sup> 여기에서 응력 진폭에 대해 다음과 같이 정의하였다.

$$\bar{D}^{NB} = v_0 C^{-1} (\sqrt{2m_0})^k \Gamma(1 + \frac{k}{2}) \quad (1)$$

여기서  $v_0$ 은 x축과 교차값, C와 k는 재료 피로 매개변수이다,  $m_0$ 은 0번째 스펙트럴 모멘트,  $\Gamma()$ 는 오일러 감마 함수로서 다음과 같이 정의된다.

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

### 2.2. Dirlik method를 이용한 광대역 주파수 영역의 진동 피로해석

1985년에 고안된 Dirlik 방법<sup>(11)</sup>은 하나의 지수 및 두 개의 Rayleigh 확률 밀도를 조합하여 사이클 진폭 분포를 근사화한다. 두 개의 서로 다른 스펙트럼 그룹에 대한 시간 이력의 수치해석에 기초하며 오래 전부터 가장 좋은 방법 중 하나로 여겨져 왔다. 이 식의 확률밀도 함수인  $p(s)$ 는 PSD에서 계산되는 면적 모멘트  $m_0, m_1, m_2$ , 및  $m_4$  변수로 계산할 수 있다. Dirlik method는 상용 동적 피로해석 프로그램에 적용되어 폭넓게 적용되어 사용하고 있다.

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

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 Nastran을 사용하여 입력 PSD 및 교차 스펙트럼을 결합하여 주응력 대 주파수를 계산한다.

### 3. 진동 피로해석을 위한 하중의 표준화

#### 3.1. 배터리 지지 구조의 유한요소 모델

차량에 발생하는 관성력이나 진동에 의한 공진에 대한

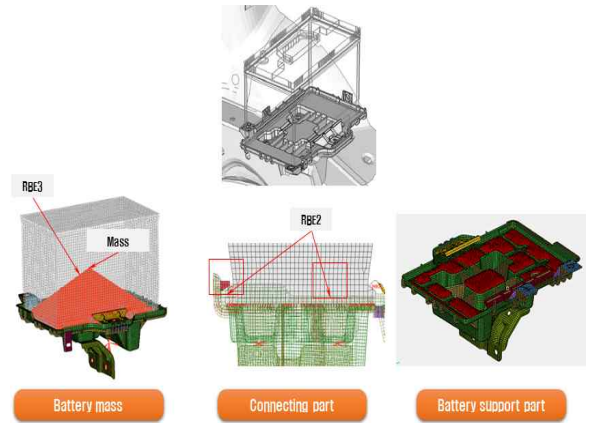


Fig. 2 FE model of battery support calculating vibration fatigue

문제를 내구적인 측면에서 접근하기 위해 배터리 지지 구조는 배터리의 질량을 집중질량으로 표현하고 연결요소 (RBE3)를 사용하여 3차원으로 구성된 배터리 지지 구조 모델에 연결한다. 구성된 유한요소 모델에 가속도계로부터 하중조건을 입력하여 해석을 수행하여 시험결과로 나온 취약부 재현성을 검토할 수 있다. 이후 각 차종별 계측 가속도를 이용하여 진동하중 표준화를 수행하여 Random vibration 내구해석을 통해 내구수명을 계산한다.

#### 3.2. 진동 하중의 표준화

차량 개발시 모든 부품의 신호 데이터를 획득할 수 있으나 시간과 비용의 제약을 받게 된다. 기존의 개발 데이터를 활용하여 다음 세대 차량에 대한 부품 부위의 하중을 예측할 수 있다. 방향에 따른 신호의 최대값을 검토하

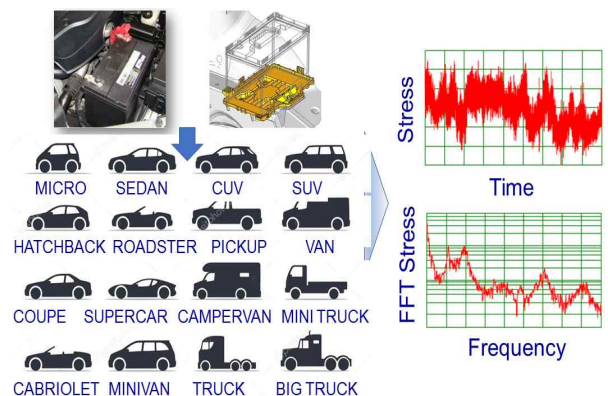


Fig. 3 Normalization process of automobile conventional load for vibration fatigue

고 손상을 부여하는 주파수 영역을 검토하여 차종에 따라 표준 신호를 다르게 평가한다.

일반적으로 Fig. 3과 같이 기존에 개발된 신호 데이터에 가중치를 부여하여 하중을 수정한 후, 초기 해석을 수행할 수 있다. 이후 시험 결과를 획득하여 설계 변경 여부를 확인한다. 표준화 과정은 같은 단위에서 표현된 가속도의 PSD 신호 이용하여 유사 차량 플랫폼의 하중을 이용하여 손상을 많이 주는 주파수를 선택한다. 주로 신호에 따라 10~15개를 선택할 수 있다. 왜냐하면 손상을 주는 주파수의 영역이 좁거나 넓기 때문이다. 그리고 넓은 영역으로 표현되는 고 주파수 영역의 경우는 5Hz 단위로 표현하여 주파수와 RMS 값의 순서쌍으로 뽑고 각 신호를 sine 파형으로 생성 후 더한다. Fig. 4와 같이 두 개 이상의 하중을 섞을 경우 RMS 값을 하중 개수로 나눠서 표현할 수 있다.

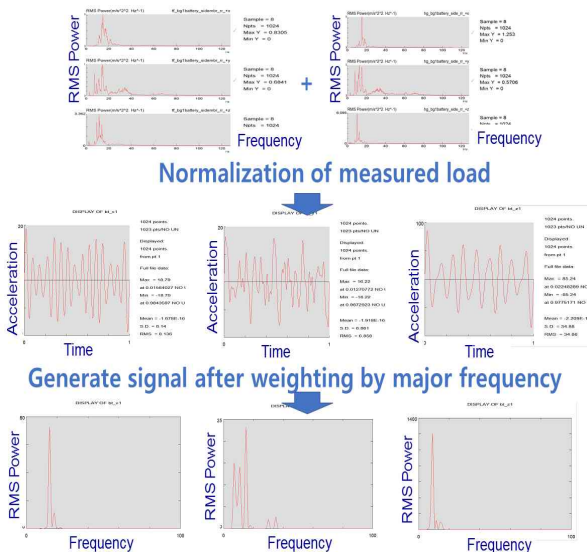


Fig. 4 Signal normalization of conventional loadcase

#### 4. 자동차 배터리 지지 구조의 진동 피로해석

배터리 지지 구조에 들어오는 하중 이력을 추적하기 위해 배터리 밑 차량 하부의 계측위치의 신호를 이용하였다. Fig. 5와 같이 x, y, z 방향에 따라 신호를 구분하여 계측하여 획득하였으며, 다른 차량의 시험결과와 비교하여 수명은 신호별로 차이가 있으나 취약부는 동일하게 나오는지 검토한다. 취약부는 진동 피로해석을 수행하여 내구 지수(damage index)가 가장 크게 나오는 위치를 파악한다. 본 논문에서는 MSC. Fatigue를 이용하여 취약부를 계산하였다.

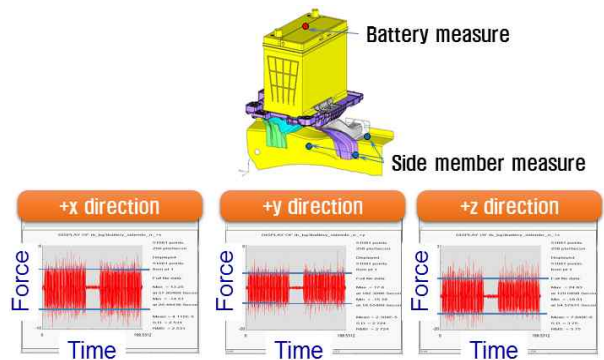


Fig. 5 Vibration measurement data of initial automobile

#### 4.1. 계측하중 신호를 적용한 기준 모델의 진동 피로 해석

Fig. 6과 7은 배터리와 지지 구조물이 적용된 시험 차량의 신호를 계측하여 시험 차량의 배터리 지지 구조물의 진동피로해석을 수행한 결과이다. 결과에서 보듯이 변형률-수명 선도를 이용하여 내구 지수를 산출한 결과가 응력-수명 선도를 이용한 값보다 0.06~0.1 낮음을 확인하였다.

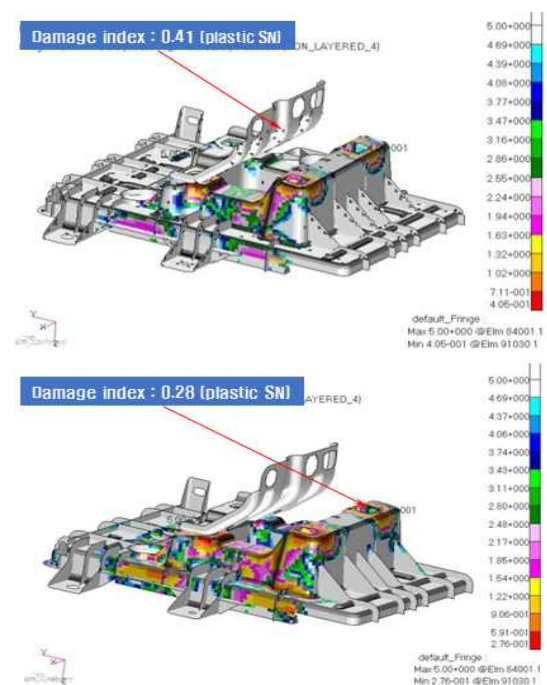


Fig. 6 Vibration fatigue results of initial automobile using test signal



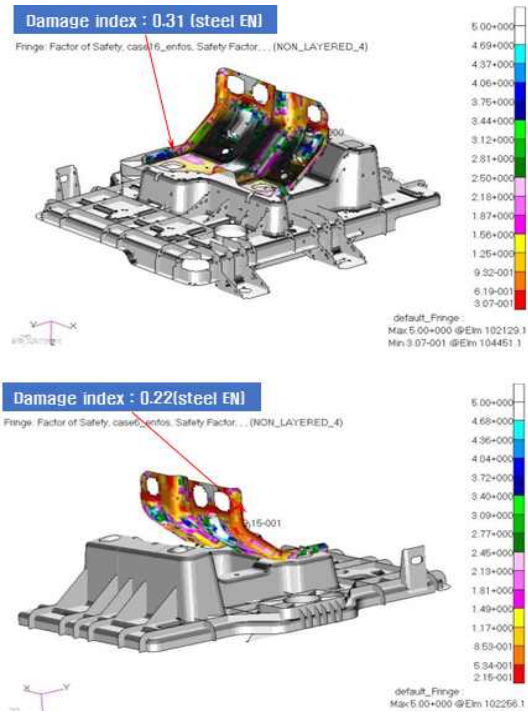


Fig. 7 Vibration fatigue results of initial automobile using test signal

4.2. 표준하중 적용을 적용한 진동 피로해석

Fig. 8은 배터리 지지 구조에 가속도계를 부착하여 진동차량의 power spectrum density를 측정한 값이다. x 방향의 PSD 분석결과 약 15Hz 영역에서 가장 큰 RMS값

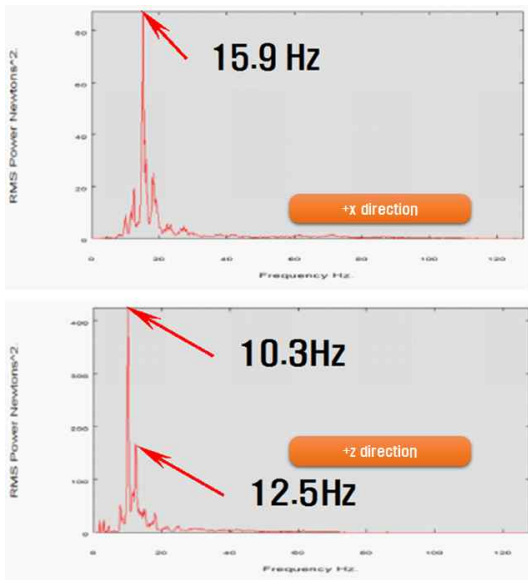


Fig. 8 PSD for measuring vibration load at test vehicle

을 가지고 있다.

z 방향은 11Hz 영역에서 가장 큰 RMS값을 가지고 있으며 x방향 RMS 대비 337% 큰 RMS 값을 가진다. 측정된 값이 내구시험과 동일한 내구 가속도를 발생시키는 진

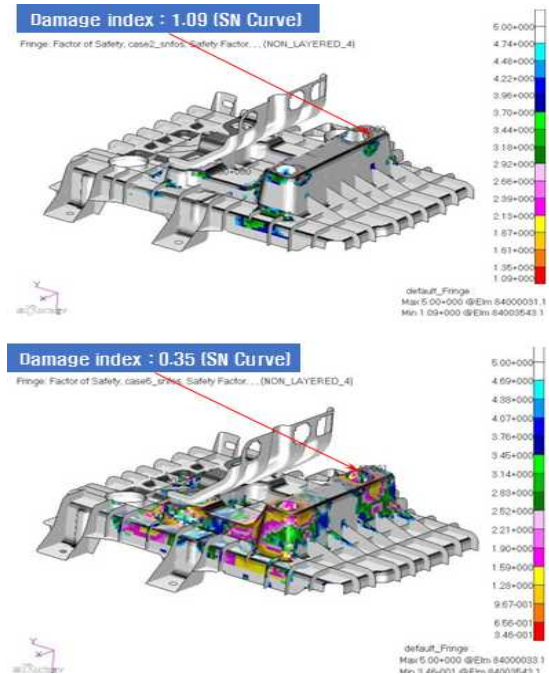


Fig. 9 Vibration fatigue results of initial automobile using test signal

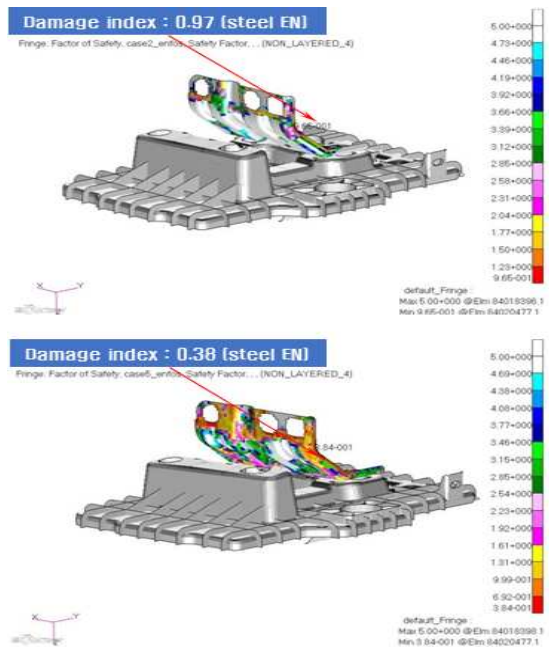


Fig. 10 Vibration fatigue results of initial automobile using test signal

Table 1 Damage index comparison

Location	Analysis using test data		Analysis using scaled test data	
	S-N Curve	E-N Curve	S-N Curve	E-N Curve
Upper	0.41	0.31	1.09	0.97
Lower	0.28	0.22	0.35	0.38

동수로 가진하는 시험조건이다. 이 값을 이용하여 개발 차량의 내구 가속도를 발생시키는 진동수로 적용한다.

Fig. 9와 10은 배터리와 지지 구조물이 적용된 시험 차량의 신호를 계측하여 타 기종 개발 차량의 배터리 지지 구조물의 진동피로해석을 수행한 결과로 취약부는 동일 부분에서 계산되었다. Table 1에서 부위별 내구지수는 S-N Curve(응력-수명 선도)와 E-N Curve(변형률-수명 선도)로 각각 적용하여 산출하였다. 적용 차량에서 내구 지수는 E-N Curve를 이용하여 내구지수를 계산하면 상단부에서는 11%의 수명이 증가하고, 하단부에서는 8% 수명 감소하는 결과가 나온 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 단품 진동 내구시험에 효율적인 진동내구 성능 예측방법을 제시하기 위해 차량 부품에 대한 진동 하중과 해석결과를 분석하여 개발 차량에 대한 진동내구 성능예측을 수행하였다.

주파수 응답해석기법을 통해 단품 진동내구 성능을 효율적으로 예측하기 위해 공통적으로 적용할 수 있는 선별된 시험 하중을 적용하였다. 진동하중에 대한 차량 부품의 취약부를 확인하고 선별된 하중에 가중치를 적용하면 개발 차량에 시험을 적용한 효과를 얻을 수 있다. 응력-수명 선도를 이용한 내구 지수와 변형률-수명 선도를 이용한 내구 지수값의 차이를 볼 때 가진원이 고주기 진동인지 저주기 진동인지 파악할 필요가 있다. 이후 정확한 내구성능 예측을 위해서 단품 진동내구 시험조건 설정 시 내구시험과 동등 수준의 내구 가속도를 발생시키는 진동수로 가진하면 개발차량에 대한 진동 피로해석을 검증할 수 있을 것이다.

후 기

본 논문은 2019년도 신한대학교 학술연구비 지원으로 연구되었음.

참고문헌

- (1) S.-H. Han, D.-G. An, S.-J. Kwak, and K.-W. Kang, 2013, "Vibration fatigue analysis for multi-point spot-welded joints based on frequency response changes due to fatigue damage accumulation", International Journal of Fatigue, Vol. 48, pp. 170~177.
- (2) B. Julien, F. Bertrand, and Y. Thierry, 2013, "Probabilistic Random Vibration Fatigue", Procedia Engineering, Vol. 66, pp. 522~529.
- (3) M. Mrnik, J. Slavi, and M. Boltar, 2013, "Frequency-domain methods for a vibration-fatigue-life estimation - Application to real data", International Journal of Fatigue, Vol. 47, pp. 8~17.
- (4) F. Liu, Y. Lu, Z. Wang, and Z. Zhang, 2015, "Numerical simulation and fatigue life estimation of BGA packages under random vibration loading", Microelectronics Reliability, Vol. 55, pp. 2777~2785.
- (5) K. A. Ragab, A. Bouaicha, and M. Bouazara, 2018, "Development of fatigue analytical model of automotive dynamic parts made of semi-solid aluminum alloys", Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Vol. 28, pp. 1226~1232.
- (6) 이명규, 박한승, 문호산, 박태원, 2018, "고주파 진동에 의한 상용차용 벨로우즈의 피로수명 해석", 한국자동차공학회 논문집, Vol. 26, pp. 319~325.
- (7) 조병진, 정의철, 구정서, 2018, "랜덤진동을 고려한 철도차량 주 변압기의 내구 특성 평가", 한국생산제조학회지, Vol. 27, pp. 524~532.
- (8) Y. S. Kong, S. Abdullah, D. Schramm, M. Z. Omar, and S. M. Haris, 2019, "Development of multiple linear regression-based models for fatigue life evaluation of automotive coil springs", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 118, pp. 675~695.
- (9) R. C. Ugras, O. K. Alkan, S. Orhan, M. Kutlu, and A. Mugan, 2019, "Real time high cycle fatigue estimation algorithm and load history monitoring for vehicles by the use of frequency domain methods", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 118, pp. 290~304.
- (10) J. W., Miles, 1965, "On structural fatigue under random loading", Journal of Aeronaut Soc, Vol. 21, No. 7, 53~62.
- (11) T., Dirlik, 1985, "Application of computers in fatigue analysis. Ph.D. thesis", The University of Warwick.