



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0039906
(43) 공개일자 2017년04월12일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01M 13/00 (2006.01) G01M 7/02 (2006.01)
G01N 3/32 (2006.01) G06F 17/10 (2006.01)

(52) CPC특허분류
G01M 13/00 (2013.01)
G01M 7/02 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2015-0139059

(22) 출원일자 2015년10월02일

심사청구일자 2015년10월02일

(71) 출원인
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 신선로 365 (용당동,
부경대학교)

(72) 발명자
김찬중
서울특별시 양천구 은행정로4길 15-2, 202호(신정
동, 예비양하우스)

(74) 대리인
김정수

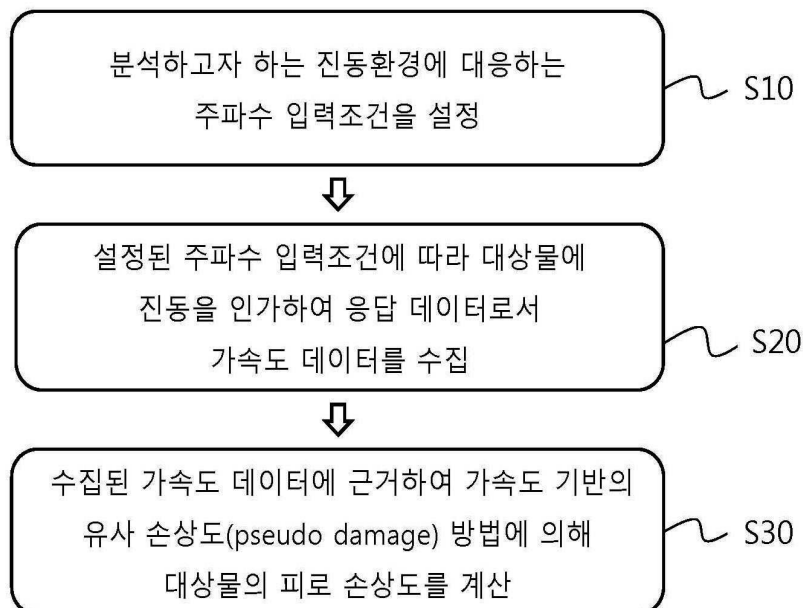
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법

(57) 요약

본 발명은, 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 관한 것으로, 본 발명에 따르면, 시간 영역에서 피로 손상도를 계측하기 위해 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정한 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 기존의 방법들은 정확하 (뒷면에 계속)

대표도 - 도1



기는 하나 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있고, 이러한 난점을 해소하기 위해 주파수 영역에서 계산하는 종래의 방법들은 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 피로 손상도 계산방법들의 문제점을 해결하여, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에서 가속도 데이터를 활용한 랜덤(random) 가진상태에서 피로 손상도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 조화(harmonic) 가진 상태에서의 피로도 계산 방법과 연계하여, 랜덤, 조화 및 SOR 가진상태에서 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법이 제공된다.

(52) CPC특허분류

G01M 7/025 (2013.01)

G01N 3/32 (2013.01)

G06F 17/10 (2013.01)

G01N 2203/0008 (2013.01)

G01N 2203/0073 (2013.01)

G01N 2203/027 (2013.01)

명세서

청구범위

청구항 1

자동차 부품을 포함하는 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산시, 처리해야 하는 데이터의 양이 많아지는 단점이 있었던 종래기술의 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법과, 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 처리를 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 실행시키도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법에 있어서,

상기 처리는,

분석하고자 하는 진동환경에 대응하는 주파수 입력조건을 설정하는 입력조건 설정단계;

상기 입력조건 설정단계에서 설정된 주파수 입력조건에 따라 대상물에 진동을 인가하여 응답 데이터로서 가속도 데이터를 취득하는 데이터 수집단계; 및

상기 데이터 수집단계에서 얻어진 가속도 데이터에 근거하여, 가속도 기반의 유사 손상도(pseudo damage) 방법에 의해 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하는 피로 손상도 계산단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 입력조건 설정단계는,

단일 주파수 입력조건, 랜덤 주파수 입력조건 및 두 가지 조건이 복합적으로 작용하는 SOR(단일 + 랜덤) 입력조건을 필요에 따라 선택적으로 설정하여, 각각의 입력조건에 따라 상기 대상물에 각각 서로 다른 다양한 진동 스펙트럼을 인가하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 데이터 취득단계는,

상기 대상물에 가속도 측정장치를 부착하여, 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 주파수 입력조건에 따라 인가되는 진동에 따른 상기 대상물의 가속도에 대한 데이터를 실시간으로 측정하여 수집하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 피로 손상도 계산단계는,

상기 입력조건 설정단계에서 설정된 각각의 단일 주파수 입력조건, 랜덤 주파수 입력조건 및 SOR 입력조건에 따라 각각 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에

대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 피로 손상도 계산단계는,

상기 입력조건 설정단계에서 설정된 입력조건이 단일 주파수 입력조건인 경우, 이하의 수학적식을 이용하여 상기 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i T_i}{\pi} S_0^{\frac{1}{b}} \| H_{m,i}(\omega_i) \|^{-\frac{1}{b}} \overline{a_i}(\omega_i)^{-\frac{1}{b}}$$

(여기서, N은 이산화된 주파수 영역의 성분들의 합계 숫자, ω_i 는 주파수, T_i 는 총 가진시간, b 및 S_0 는 대상물의 S-N 선도 관련 기울기와 절점(intercept) 응력, a_i 는 가속도를 각각 나타냄)

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 피로 손상도 계산단계는,

상기 입력조건 설정단계에서 설정된 입력조건이 랜덤 주파수 입력조건인 경우, 응력의 제곱평균제곱근 값이 σ_R 이고, 파괴율이 C_f 라 하고, 최대 크기의 기대값을 이하의 수학적식으로 나타낼 때,

$$\sigma_{max} = M_{max} \gamma$$

$$\gamma = \frac{\sigma_R C_f}{M_{max}}$$

이하의 수학적식을 이용하여 상기 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i T_i}{\pi} S_0^{\frac{1}{b}} \gamma^{-\frac{1}{b}} \sum_{j=i}^N \left(\| H_{m,j}(\omega_j) \|^{-\frac{1}{b}} \overline{a_j}(\omega_j)^{-\frac{1}{b}} \right)$$

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 피로 손상도 계산단계는,

상기 입력조건 설정단계에서 설정된 입력조건이 SOR 입력조건인 경우, 조화 가진과 랜덤 가진이 주파수 ω_i 에 대해 각각 $T_{h,i}$, $T_{r,i}$ 만큼 인가되는 것으로 할 때, 반복 횟수는 $N_{h,i}$, $N_{r,i}$ ($N_{h,i} < N_{r,i}$)로 계산되고, $N_{h,i}$ 횟수 동

안 응력의 크기는 랜덤과 조화가진 크기가 중첩되며, 나머지 반복횟수 동안에는 랜덤 가진 크기만 영향을 주게 되는 것에 근거하여,

이하의 수학적식을 이용하여 상기 주파수 ω_i 에서 상기 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

$$D(\omega_i) = N_{h,i} S_0^{\frac{1}{b}} \left[\left\| H_{m,i}(\omega_i) \right\|^{\frac{-1}{b}} \overline{a_i}(\omega_i)^{\frac{-1}{b}} + \gamma^{\frac{-1}{b}} \sum_{j=i}^N \left(\left\| H_{m,j}(\omega_j) \right\|^{\frac{-1}{b}} \overline{a_j}(\omega_j)^{\frac{-1}{b}} \right) \right] + (N_{r,i} - N_{h,i}) S_0^{\frac{1}{b}} \left\| H_{m,i}(\omega_i) \right\|^{\frac{-1}{b}} \overline{a_i}(\omega_i)^{\frac{-1}{b}}$$

청구항 8

제 7항에 있어서,

상기 계산방법은,

상기 피로 손상도 계산단계에서 계산된 피로 손상도를 상기 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법 및 상기 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법을 포함하는 종래기술의 계산방법에 의해 구해진 피로 손상도와 비교하여 오차를 검증하는 검증단계를 더 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법.

청구항 9

청구항 1항 내지 청구항 8항 중 어느 한 항에 기재된 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 수행시키도록 구성되는 프로그램이 기록된 컴퓨터에서 판독 가능한 기록매체.

청구항 10

자동차 부품을 포함하는 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산시, 처리해야 하는 데이터의 양이 많아지는 단점이 있었던 종래기술의 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법과, 조화(harmonic)가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 피로 손상도 계산시스템에 있어서,

분석하고자 하는 진동환경에 대응하는 주파수 입력조건을 설정하고 입력하기 위한 입력부;

상기 입력부를 통해 입력된 입력조건에 따라 대상물에 진동환경을 인가하고 상기 대상물로부터 측정된 응답데이터를 수집하는 진동시험부;

상기 진동시험부에 의해 수집된 상기 응답데이터에 근거하여 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하기 위한 분석부; 및

상기 분석부에 의해 분석된 분석결과를 시각적으로 표시하기 위한 표시부를 포함하여 구성되고,

상기 분석부는,

청구항 1항 내지 청구항 8항 중 어느 한 항에 기재된 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 수행하여 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하고 분석하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 피로 손상도 계산시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은, 예를 들면, 자동차 부품 등과 같은 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 관한 것으로, 더 상세하게는, 종래, 시간 영역에서 피로 손상도를 예측하기 위해 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 기존의 방법들은 정확하기는 하나 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있고, 이러한 난점을 해소하기 위해 주파수 영역에서 계산하는 종래의 방법들은 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 피로 손상도 계산방법들의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 상태뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법에 관한 것이다.

[0003] 또한, 본 발명은, 상기한 바와 같이 랜덤, 조화 및 SOR 가진 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 하기 위해, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR 가진조건에서 가속도 데이터를 활용한 랜덤(random) 가진상태에서 피로 손상도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 조화(harmonic) 가진 상태에서의 피로도 계산방법과 연계하여, 궁극적으로 랜덤, 조화 및 SOR 가진상태에서 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0005] 일반적으로, 기계 시스템의 진동 시험은 크게 조화(Harmonic) 가진과 랜덤(Random) 가진으로 나눌 수 있으며, 대상 시스템이 작동 상태에서 어떤 형태의 진동 패턴에 노출되는가에 따라 주파수 성분들이 결정된다.

[0007] 예를 들면, 대표적인 기계 시스템인 자동차 부품의 경우, 국제(ISO 16750-3:2007(E) 참조) 또는 국내(KS R 1034(2006v) 참조) 규격에서 대상 부품들에 따라 체계적으로 진동 프로파일을 제안하였으며, 조화 진동 성분과 랜덤 성분이 동시에 발생하는 복합 진동패턴을 나타내는 시스템에 대하여는, 미국 국방 규격에서 SOR(sine-on-random)이라고 명명된 진동 프로파일에 대한 시험방법을 제시하였다(MIL-STD-810G 참조).

[0009] 또한, 종래의 연구에서는, SOR 진동시험과 기존의 조화 가진, 랜덤 가진 시험과 피로 손상도 측면에서 비교 분석을 수행하여 대상 시스템이 복합 스펙트럼 패턴을 보일 경우 SOR 시험을 진행하는 것이 타당함이 제시된 바 있다.

[0011] 즉, 진동 환경에 있어서는, 대상 시스템이 높은 주파수 가진에 노출되기 때문에 변형률 성분의 경우 측정 부위가 매우 취약한 부위임에도 불구하고 잡음 등의 영향을 받아 신뢰도가 떨어지며, 가속도 응답의 경우 신호 크기 측면에서 매우 유리한 입장이지만 가속도 물리량이 직접적으로 피로 손상도 값을 도출하지 못하기 때문에 에너지 등고선 등을 이용한 간접적인 방법 또는 유사 손상도(pseudo damage) 등이 이용되었다.

[0013] 아울러, 가속도 데이터를 활용하여 피로 손상도를 예측하는 과정에서 시간 영역에서의 카운트 방법과 주파수

영역의 방법이 모두 가능하기 때문에 어떤 방법을 선택하는가에 따라 결과값에 차이가 발생하며, 특히, 에너지 등고선을 활용한 피로 손상도 예측 방법은 변형률 기반의 물리적인 피로 손상도이면서 입력 진동을 정규화하기 때문에 피로 손상도를 서로 비교 평가하는데 높은 신뢰성을 보장할 수 있다.

[0015] 여기서, 상기한 바와 같은 부품이나 구조물의 피로 손상도를 계산하는 방법에 관한 종래기술의 예로는, 예를 들면, 먼저, 한국 등록특허공보 제10-1414520호에 따르면, 서로 다른 주파수의 신호들을 둘 다 인가하여 구조물을 진동시키는 단계, 진동에 의해 발생한 구조물의 응답을 디지털 신호로 변환하는 단계, 디지털 신호로부터 주파수 신호들의 고조파 응답과 선형 응답을 제거하고 동기복조하여 일차 변조 신호를 추출하는 단계, 서로 다른 주파수의 신호들의 주파수를 연속 변화시켜 일차 변조 신호들을 추출하고 일차 변조 신호들을 결합하여 제 1 측파대 스펙트로그램(first sideband spectrogram)을 생성하는 단계 및 제 1 측파대 스펙트로그램으로부터 구조물의 균열유무를 판별하는 단계를 포함하여, 초음파의 전압 레벨이 매우 작더라도 손상유무를 정밀하게 판별할 수 있어 센서의 전력 소비를 감소시킬 수 있도록 구성되는 비선형 초음파 모듈레이션 기법을 이용한 구조물의 안전진단방법에 관한 기술내용이 제시된 바 있다.

[0017] 또한, 상기한 바와 같은 부품이나 구조물의 피로 손상도를 계산하는 방법에 관한 종래기술의 다른 예로는, 예를 들면, 일본공개특허공보 JP 2014-44221호에 따르면, 내부에 형성된 공간에 부식 매체를 도입한 시험편의 표면에 반복적으로 하중을 부가하고, 하중을 부가한 후의 시험편의 내부 공간의 표면 및/또는 단면을 관찰하도록 구성됨으로써, 금형의 내냉공에 발생하는 부식 피로 손상을 시험편을 사용하여 간편하게 재현할 수 있도록 구성되는 부식 피로 손상의 평가방법에 관한 기술내용이 제시된 바 있다.

[0019] 아울러, 상기한 바와 같은 부품이나 구조물의 피로 손상도를 계산하는 방법에 관한 종래기술의 또 다른 예로는, 예를 들면, 국제공개특허공보 WO 2013/160055호에 따르면, 롤링-요소 베어링의 롤링접촉에 의해 발산되는 고주파수 응력과 이벤트의 발생의 크기 및/또는 주파수를 측정하는 단계, 측정 데이터를 기록 데이터로서 기록하는 단계 및 기록 데이터 및 ISO(International Organization for Standardization) 롤링-요소 베어링 수명 모델을 이용해 상기 롤링-요소 베어링의 잔여 수명을 예측하는 단계를 포함하여, ISO 롤링-요소 베어링 수명 모델의 누적 피로 손상에 대한 값을 이용하는 대신에 베어링의 롤링 접촉에 의해 발산되는 고주파수 응력과 크기의 크기 및/또는 횟수의 측정치로부터 누적 피로 손상을 결정하여 베어링의 잔여수명을 예측하도록 구성되는 베어링 모니터링 방법 및 시스템에 관한 기술내용이 제시된 바 있다.

[0021] 더욱이, 상기한 바와 같은 부품이나 구조물의 피로 손상도를 계산하는 방법에 관한 종래기술의 또 다른 예로는, 예를 들면, 한국 등록특허공보 제10-0305723호에 따르면, 발전 설비에 있어서, 운전중 응력집중 및 파손이 예상되는 부위의 기계설비에 변형률측정센서와 열전대를 취부하고, 열전대로부터 검출되어 입력되는 온도와 변형률측정센서로부터 검출되어 입력되는 응력-변형률을 연속적으로 측정하여, 신호변환장치를 통해 디지털화한 후 컴퓨터에서 소성에너지 및 변형률 분할을 통해 히스테리시스 루프를 해석하여 히스테리시스 루프로부터 크리프와 소성변형량의 실시간 분할, 총 횟수를 이용하여 피로수명을 평가하는 단계; 루프의 내부면적인 소성변형에너지를 이용하여 피로수명을 평가하는 단계; 루프의 탄성변형과 소성변형이 합산된 총변형율을 이용하여 피로수명을 평가하는 단계; 루프로부터 분석된 응력과 온도를 크리프 파라메타와 크리프 수명 소비선도를 이용하여 크리프 수명을 평가하는 단계; 크리프-피로 상호작용지수를 계산하여 복합하중이 작용하는 기계설비의 수명을 실시간, 누적 처리하는 단계를 포함하여 구성됨으로써, 복잡한 하중을 받는 기계설비의 사용수명을 정확히 측정하여 설비의 안전운전을 도모하고 기계설비의 교체시기를 정확히 예측할 수 있도록 구성되는 변형률을 이용한 복합하중을 받는 기계설비의 자동 수명 평가방법에 관한 기술내용이 제시된 바 있다.

[0023] 상기한 바와 같이, 종래, 기계 부품이나 구조물의 피로 손상도를 계산하기 위한 여러 가지 기술내용들이 제시된 바 있으나, 상기한 바와 같은 종래기술의 방법들은 다음과 같은 문제점이 있는 것이었다.

[0025] 더 상세하게는, 자동차 부품 등과 같은 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방

법에 있어서, 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정된 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 종래기술의 시간 영역에서의 피로 손상도 측정방법은, 다른 방법들에 비해 가장 정확한 결과값을 얻을 수는 있으나, 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있었다.

[0027] 이에, 상기한 바와 같이 방대한 양의 데이터가 요구되는 시간 영역에서의 계산방법의 단점을 해소하기 위해, 종래, 변형률(응력) 데이터를 PSD 변환하여 주파수 영역에서 물리적인 손상도를 계산하는 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법이 제시되어 현재 많은 상용 프로그램들에 의해 제공되고 있으나, 이러한 종래기술의 주파수 영역 계산방법들은, 대상물이 조화(harmonic) 가진 상태인 경우에만 적용 가능하고, 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도는 계산할 수 없는 한계가 있는 것이었다.

[0029] 따라서 상기한 바와 같은 종래기술의 문제점을 해결하기 위하여는, 기존의 랜덤(random) 및 조화(harmonic) 가진 상태뿐만 아니라, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에서 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성됨으로써, 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있었던 종래기술의 시간영역에서의 피로 손상도 계산방법과, 조화 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법의 문제점을 모두 해결할 수 있도록 구성되는 새로운 구성의 피로 손상도 계산방법을 제시하는 것이 바람직하나, 아직까지 그러한 요구를 모두 만족시키는 장치나 방법은 제공되지 못하고 있는 실정이다.

[0031] [선행기술문헌]

- [0032] 1. 한국 등록특허공보 제10-1414520호 (2014.06.26.)
- [0033] 2. 일본공개특허공보 JP 2014-44221호 (2014.03.13.)
- [0034] 3. 국제공개특허공보 WO 2013/160055호 (2013.10.31.)
- [0035] 4. 한국 등록특허공보 제10-0305723호 (2001.08.01.)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0037] 본 발명은 상기한 바와 같은 종래기술의 문제점을 해결하고자 하는 것으로, 따라서 본 발명의 목적은, 예를 들면, 자동차 부품 등과 같은 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 있어서, 시간 영역에서 피로 손상도를 측정하기 위해 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정된 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 기존의 방법들은 정확하기는 하나 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있고, 이러한 난점을 해소하기 위해 주파수 영역에서 계산하는 종래의 방법들은 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 피로 손상도 계산방법들의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 상태뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 제공하고자 하는 것이다.

[0039] 또한, 본 발명의 다른 목적은, 상기한 바와 같이 랜덤, 조화 및 SOR 가진 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 하기 위해, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR 가진조건에서 가속도 데이터를 활용한 랜덤(random) 가진상태에서 피로 손상도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 조화(harmonic) 가진 상태에서의 피로도 계산방법과 연계하여, 궁극적으로 랜덤, 조화 및 SOR 가진상태에서 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 제공하고자

하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0041] 상기한 바와 같은 목적을 달성하기 위해, 본 발명에 따르면, 자동차 부품을 포함하는 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산시, 처리해야 하는 데이터의 양이 많아지는 단점이 있었던 종래기술의 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법과, 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 처리를 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 실행시키도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법에 있어서, 상기 처리는, 분석하고자 하는 진동환경에 대응하는 주파수 입력조건을 설정하는 입력조건 설정단계; 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 주파수 입력조건에 따라 대상물에 진동을 인가하여 응답 데이터로서 가속도 데이터를 취득하는 데이터 수집단계; 및 상기 데이터 수집단계에서 얻어진 가속도 데이터에 근거하여, 가속도 기반의 유사 손상도(pseudo damage) 방법에 의해 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하는 피로 손상도 계산단계를 포함하여 구성되는 것을 특징으로 하는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법이 제공된다.
- [0043] 여기서, 상기 입력조건 설정단계는, 단일 주파수 입력조건, 랜덤 주파수 입력조건 및 두 가지 조건이 복합적으로 작용하는 SOR(단일 + 랜덤) 입력조건을 필요에 따라 선택적으로 설정하여, 각각의 입력조건에 따라 상기 대상물에 각각 서로 다른 다양한 진동 스펙트럼을 인가하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0045] 또한, 상기 데이터 취득단계는, 상기 대상물에 가속도 측정장치를 부착하여, 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 주파수 입력조건에 따라 인가되는 진동에 따른 상기 대상물의 가속도에 대한 데이터를 실시간으로 측정하여 수집하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0047] 아울러, 상기 피로 손상도 계산단계는, 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 각각의 단일 주파수 입력조건, 랜덤 주파수 입력조건 및 SOR 입력조건에 따라 각각 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 한다.
- [0049] 즉, 상기 피로 손상도 계산단계는, 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 입력조건이 단일 주파수 입력조건인 경우, 이하의 수학식을 이용하여 상기 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i T_i}{\pi} S_0^{\frac{1}{b}} \| H_{m,i}(\omega_i) \|^{-\frac{1}{b}} \frac{1}{a_i(\omega_i)^{\frac{1}{b}}}$$

[0051]

- [0053] (여기서, N은 이산화된 주파수 영역의 성분들의 합인 숫자, ω_i 는 주파수, T_i 는 총 가진시간, b 및 S_0 는 대상물의 S-N 선도 관련 기울기와 절점(intercept) 응력, a_i 는 가속도를 각각 나타냄)

- [0055] 또한, 상기 피로 손상도 계산단계는, 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 입력조건이 랜덤 주파수 입력조건인 경우, 응력의 제곱평균제곱근 값을 σ_R , 파괴율을 C_f 라 하고, 최대 크기의 기대값을 이하의 수학식으로 나타

낼 때,

$$\sigma_{\max} = M_{\max} \gamma$$

$$\gamma = \frac{\sigma_R C_f}{M_{\max}}$$

이하의 수학식을 이용하여 상기 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i T_i}{\pi} S_0^{\frac{1}{b}} \gamma^{\frac{-1}{b}} \sum_{j=i}^N \left(\| H_{m,j}(\omega_j) \| \frac{-1}{b} \overline{a_j}(\omega_j)^{\frac{-1}{b}} \right)$$

아울러, 상기 피로 손상도 계산단계는, 상기 입력조건 설정단계에서 설정된 입력조건이 SOR 입력조건인 경우, 조화 가진과 랜덤 가진이 주파수 ω_i 에 대해 각각 $T_{h,i}$, $T_{r,i}$ 만큼 인가되는 것으로 할 때, 반복 횟수는 $N_{h,i}$, $N_{r,i}$ ($N_{h,i} < N_{r,i}$)로 계산되고, $N_{h,i}$ 횟수 동안 응력의 크기는 랜덤과 조화가진 크기가 중첩되며, 나머지 반복횟수 동안에는 랜덤 가진 크기만 영향을 주게 되는 것에 근거하여, 이하의 수학식을 이용하여 상기 주파수 ω_i 에서 상기 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성되는 것을 특징으로 한다.

$$D(\omega_i) = N_{h,i} S_0^{\frac{1}{b}} \left[\| H_{m,i}(\omega_i) \| \frac{-1}{b} \overline{a_i}(\omega_i)^{\frac{-1}{b}} + \gamma^{\frac{-1}{b}} \sum_{j=i}^N \left(\| H_{m,j}(\omega_j) \| \frac{-1}{b} \overline{a_j}(\omega_j)^{\frac{-1}{b}} \right) \right] + (N_{r,i} - N_{h,i}) S_0^{\frac{1}{b}} \| H_{m,i}(\omega_i) \| \frac{-1}{b} \overline{a_i}(\omega_i)^{\frac{-1}{b}}$$

더욱이, 상기 계산방법은, 상기 피로 손상도 계산단계에서 계산된 피로 손상도를 상기 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법 및 상기 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법을 포함하는 종래기술의 계산방법에 의해 구해진 피로 손상도와 비교하여 오차를 검증하는 검증단계를 더 포함하여 구성되는 것을 특징으로 한다.

또한, 본 발명에 따르면, 상기에 기재된 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 수행시키도록 구성되는 프로그램이 기록된 컴퓨터에서 판독 가능한 기록매체가 제공된다.

아울러, 본 발명에 따르면, 자동차 부품을 포함하는 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손

상도 계산시, 처리해야 하는 데이터의 양이 많아지는 단점이 있었던 종래기술의 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법과, 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 피로 손상도 계산시스템에 있어서, 분석하고자 하는 진동환경에 대응하는 주파수 입력조건을 설정하고 입력하기 위한 입력부; 상기 입력부를 통해 입력된 입력조건에 따라 대상물에 진동환경을 인가하고 상기 대상물로부터 측정된 응답데이터를 수집하는 진동시험부; 상기 진동시험부에 의해 수집된 상기 응답데이터에 근거하여 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하기 위한 분석부; 및 상기 분석부에 의해 분석된 분석결과를 시각적으로 표시하기 위한 표시부를 포함하여 구성되고, 상기 분석부는, 상기에 기재된 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 수행하여 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하고 분석하도록 구성되는 것을 특징으로 하는 피로 손상도 계산시스템이 제공된다.

발명의 효과

[0074] 상기한 바와 같이, 본 발명에 따르면, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진조건에서 가속도 데이터를 활용한 랜덤(random) 가진상태에서 피로 손상도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 조화(harmonic) 가진 상태에서의 피로도 계산방법과 연계하도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법이 제공됨으로써, 자동차 부품 등과 같은 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 있어서, 시간 영역에서 피로 손상도를 계측하기 위해 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정한 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 기존의 방법들은 정확하기는 하나 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있고, 이러한 난점을 해소하기 위해 주파수 영역에서 계산하는 종래의 방법들은 조화 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 피로 손상도 계산방법들의 문제점을 해결할 수 있다.

[0076] 또한, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 랜덤 및 조화 가진 상태뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성됨으로써, 다양한 가진 상황에서 발생하는 응답 가속도와 응답 변형률 사이의 선형성이 보장되는 어떠한 선형 시스템에 대하여도 적용이 가능하며, 가진 상태에서 측정된 가속도 데이터만을 활용하여 랜덤, 조화 및 SOR 상태에서 모두 적용이 가능한 장점을 가지는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 제공할 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0078] 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 2는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 성능을 검증하기 위한 진동 시험에 사용된 노치가 있는 단순 시편의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 3은 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 성능을 검증하기 위한 진동 시험을 실시하기 위해 실제 제작된 시편의 모습을 개략적으로 나타내는 도면이다.

도 4는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 성능을 검증하기 위한 진동 시험에 적용된 진동 프로파일의 구체적인 내용을 표로 정리하여 나타낸 도면이다.

도 5는 시간 영역의 계측 데이터를 활용하여 기존의 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak counting) 방법으로 변형률 및 가속도 데이터에 대한 구간별 반복횟수를 계산한 결과를 그래프로 나타내는 도면이다.

도 6은 변형률 기반 손상도 및 3가지 다른 기울기에 대한 가속도 기반의 손상도를 표로 정리하여 나타낸 도면이다.

도 7은 변형률 및 가속도 데이터를 활용하여 주파수 영역에서 계산된 피로 손상도를 표로 정리하여 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0079] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 구체적인 실시예에 대하여 설명한다.
- [0081] 여기서, 이하에 설명하는 내용은 본 발명을 실시하기 위한 하나의 실시예일 뿐이며, 본 발명은 이하에 설명하는 실시예의 내용으로만 한정되는 것은 아니라는 사실에 유념해야 한다.
- [0083] 또한, 이하의 본 발명의 실시예에 대한 설명에 있어서, 종래기술의 내용과 동일 또는 유사하거나 당업자의 수준에서 용이하게 이해하고 실시할 수 있다고 판단되는 부분에 대하여는, 설명을 간략히 하기 위해 그 상세한 설명을 생략하였음에 유념해야 한다.
- [0085] 즉, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 예를 들면, 자동차 부품 등과 같은 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 있어서, 시간 영역에서 피로 손상도를 계측하기 위해 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정한 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 기존의 방법들은 정확하기는 하나 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있고, 이러한 난점을 해소하기 위해 주파수 영역에서 계산하는 종래의 방법들은 조화(harmonic) 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 피로 손상도 계산방법들의 문제점을 해결하기 위해, 랜덤(random) 및 조화 가진 상태뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법에 관한 것이다.
- [0087] 아울러, 본 발명은, 후술하는 바와 같이, 랜덤, 조화 및 SOR 가진 상태에서의 피로 손상도를 모두 계산할 수 있도록 하기 위해, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR 가진조건에서 가속도 데이터를 활용한 랜덤(random) 가진상태에서 피로 손상도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 조화(harmonic) 가진 상태에서의 피로도 계산방법과 연계하여, 궁극적으로 랜덤, 조화 및 SOR 가진상태에서 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법에 관한 것이다.
- [0089] 즉, 랜덤(random) 및 조화(harmonic) 가진이 동시에 인가되는 SOR(sine-on-random) 시험은, 진동시험 기간을 단축시킬뿐만 아니라 이동수단 기계 시스템의 실제 진동 환경과 유사하여 최근에는 국방 분야에 적용되고 있으며, 시험의 가혹도를 나타내거나 현재 가진 조건이 실제 어떤 작동조건을 상사할 수 있는지를 계산하기 위해 피로 손상도를 계산하는 것이 필요하다.
- [0091] 그러나 기존의 랜덤 또는 조화 가진의 경우에는 해당 조건에 적합한 주파수 영역의 피로 손상도 계산 방법이 개발되어 있으나, SOR 조건에서는 기존의 방법들을 적용하기에 적합하지 않아 새로운 주파수 영역의 피로 손상도 계산 방법이 필요한 실정이다.
- [0093] 이에, 이하에 설명하는 본 발명의 실시예에서는, 가속도 데이터를 활용하여, 주파수 영역에서 선형 시스템이 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 경우의 피로 손상도를 계산하기 위해 우선 랜덤(random) 가진 상태에

서 계산 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 방법과 관련된 수식을 제안하고, 이와 동시에 기존에 알려져 있는 조화 가진 상태에서의 피로 손상도 방법과 연계하여 SOR 상태에서 계산 가능한 피로 손상도 계산 방법을 제시하였으며, 또한, 신뢰성을 확인하기 위해 노치가 있는 간단한 시편을 활용하여 진동 시험을 수행하고, 스트레인게이지를 통해 시간 영역에서 계산한 기존의 전통적인 방법과 비교하여 가속도 데이터를 활용하여 주파수 영역에서 예측한 피로 손상도가 충분히 신뢰성이 있음을 나타내었다.

[0095] 더 상세하게는, 이하에 설명하는 본 발명의 실시예에서는, 진동시험 환경에서 진동 시험 가속도 데이터 기반의 피로 손상도가 변형률 기반의 피로 손상도 대비 어느 정도의 신뢰성을 보이는지를 비교 평가하였으며, 이를 위해, 노치가 있는 간단한 선형 시편을 활용하여 한쪽 방향의 가진 시험을 수행하여, 가진 프로파일 스펙트럼 패턴은 랜덤, 조화함수 및 SOR의 3가지로 선정하고, 진동 시편에 가속도 센서 및 스트레인게이지를 부착하여 데이터를 실시간으로 측정하였으며, 측정된 응답 데이터를 활용하여 피로 손상도를 계산하였다.

[0097] 또한, 시편의 취약 부위에서 측정된 변형률 데이터를 활용하여 시간 영역에서 손상도를 계산한 후 가속도 기반의 피로 손상도와 비교 평가하였으며, 본 발명의 실시예에 있어서, 진동 시험에 기인한 피로 손상도의 경우 평균값이 0인 반복하중($R = -1$)에 의해 변형률의 크기가 작고 높은 주파수 값을 나타냄으로 인해 재료의 취약 부위에서 탄성영역에서 피로 누적에 의해 균열이 발생되므로, 피로 손상도의 계산 방법은 Minor 법칙에 의해 응력 기반의 S-N 선도로부터 계산하는 방식으로 한정하였다.

[0099] 따라서 본 발명은, 다양한 가진 상황에서 발생하는 응답 가속도와 응답 변형률 사이의 선형성이 보장되는 어떠한 선형 시스템에 대하여도 적용이 가능하며, 가진 상태에서 측정된 가속도 데이터만을 활용하여 랜덤, 조화 및 SOR 상태에서 모두 적용이 가능한 장점을 가지는 것이다.

[0101] 계속해서, 도면을 참조하여, 상기한 바와 같이 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 구체적인 내용에 대하여 설명한다.

[0103] 여기서, 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 구체적인 내용에 대하여 설명하기 전에, 시간 영역과 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 대하여 설명하면 다음과 같다.

[0105] 먼저, 시간 영역에서의 피로 손상도 계산방법에서 응력 기반의 물리적 손상도를 계산하는 방법에 대하여 설명하면, 이는, 시간 영역의 측정 데이터로부터 전통적인 카운트 방법으로 피로 손상도를 계산하는 방법으로, S-N 선도로부터 Minor 법칙을 활용하는 것이다.

[0107] 더 상세하게는, 진동 환경에서 측정된 응답 데이터의 경우 평균 응력이 존재하지 않고 응력값이 재료의 탄성 영역을 벗어나지 않기 때문에 광범위하게 활용되는 rain-flow 방법 이외에 다양한 방법을 통해서도 동일한 결과를 도출할 수 있으며, 이에, 본 발명에서는, 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak counting) 방법을 활용하여 응력 구간별 응력 반복 횟수를 계산하였다.

[0109] 즉, 만약, 분류된 i 번째 크기의 응력이 s_i 이고, 카운트된 횟수가 N_i 라고 가정하면, Minor 법칙에 의해 대상 시편은 이하의 [수학식 1]에 의해 피로 손상도가 계산될 수 있다.

[0111] [수학식 1]

$$D_i = \frac{N_i}{N_{s_i}}$$

[0112]

[0114] 여기서, 상기한 [수학식 1]에 있어서, N_{s_i} 는 해당 재료가 크기 s_i 변형률에 의해 균열이 발생할 때까지 견딜 수 있는 한계 가진 횟수이며, 분류된 모든 응력 크기에 대해 동일하게 카운트 횟수들을 계산하고 중첩시키면 이하의 [수학식 2]와 같이 피로 손상도가 도출된다.

[0116] [수학식 2]

$$D = \sum D_i$$

[0117]

[0119] 다음으로, 가속도 기반의 유사 손상도 계산방법에 대하여 설명하면, 시간 영역에서 피로 손상도를 계산하는 방법 중 변형률(응력) 기반의 물리적인 손상도 이외에 다른 물리량의 데이터를 활용한 유사 손상도(pseudo damage) 방법이 있으며, 특히, 진동 시험의 경우, 시험 프로파일, 응답 데이터 등에서 가속도만을 측정하는 것이 일반적이므로, 해당 물리량을 활용하여 시험간의 가속도를 상대 비교하기에 적당한 유사 손상도 방법을 적용할 수 있고, 예를 들면, 자동차 부품의 시험 방법으로 ISO-16750-3 등에서 세부적인 내용이 제시된 바 있다.

[0121] 더 상세하게는, 응력의 경우와 마찬가지로, 손상도 계산방법은 제로 카운팅 피크 홀드(zero-crossing peak hold)를 활용하였으며, S-N 선도와 유사하게 가속도 크기와 반복횟수로 구성된 가상의 A-N 선도를 도입하였다.

[0123] 즉, 만약, 분류된 i 번째 크기의 가속도가 a_i 이고 카운트된 횟수가 라고 가정하면, 이하의 [수학식 3]을 이용하여 손상도를 도출할 수 있다.

[0125] [수학식 3]

$$D_{a,i} = \frac{\overline{N_i}}{N_{a_i}}$$

[0126]

[0128] 여기서, 상기한 [수학식 3]에 있어서, N_{a_i} 는 a_i 가속도에 의해 파손이 발생할 것으로 가정한 한계 가진 횟수이다.

[0130] 또한, 이를 확장하여 분류된 모든 가속도 크기에 대해 동일하게 카운트 횟수들을 계산하고 중첩시키면 이하의 [수학식 4]와 같이 유사 손상도 값이 도출된다.

[0132] [수학식 4]

$$D_a = \sum D_{a,i}$$

[0133]

[0135] 여기서, 해당 유사 손상도는 시험 대상의 물리적 피로 손상도와 연관성이 없으며, 다만 2개 이상의 시험 결과들의 가속도를 상대적으로 평가하는 관점에서만 유효하다.

[0137] 계속해서, 주파수 영역에서의 피로 손상도 분석방법에 대하여 설명한다.

[0139] 먼저, 단일 주파수 입력 조건에 대하여 설명하면, 본 발명에서는 응답 가속도와 변형률 사이의 관계를 사전에 획득한 후 실제 가진 환경에서 측정된 가속도 데이터만을 활용하여 피로 손상도를 분석하는 방법을 활용하였으며, 이러한 분석 방법을 적용하기 위해서는 가속도와 변형률 사이의 주파수 응답 조건이 포함된 에너지 등고선이 도입되어야 한다.

[0141] 여기서, 상기한 방법을 적용하기 위해, 본 발명에서는, 단일 입력 스펙트럼 조건에서 대상 시편의 임의 절점에 서 획득한 가속도가 이하의 [수학식 5]와 같이 주어지고, 해당 가속도와 취약 부위의 응력 간의 관계가 이하의 [수학식 6]으로 주어지는 선형 가정이 적용되었다.

[0143] [수학식 5]

$$a_i(t) = \overline{a_i} \cos(\omega_i t + \phi)$$

[0144]

[0146] [수학식 6]

$$\overline{\sigma_i}(\omega_i) = \| H_{m,i}(\omega_i) \| \overline{a_i}(\omega_i)$$

[0147]

[0149] 여기서, $\overline{a_i}$ 와 ω_i 는 각각 진폭 및 주파수를 나타내고, ϕ 는 시간 지연이며, $\overline{\sigma_i}(\omega_i)$ 는 해당 응력의 크기 값을 나타낸다.

[0151] 또한, 응력(σ_i)은, Miner 법칙에 의해 대상 재료의 S-N 선도 관련 기울기와 절점(intercept) 응력이 각각 b와 S_0 라고 가정하면 이하의 [수학식 7]과 같이 나타낼 수 있다.

[0153] [수학식 7]

$$D_i(T_1) = \frac{\omega_i T_i}{\pi(S_0)^{-\left(\frac{1}{b}\right)} \sigma_i(\omega_i)^{-\left(\frac{1}{b}\right)}}$$

[0154]

[0156] 여기서, T_i 는 [수학식 1]의 가속도가 시스템에 인가된 총 가진 시간을 나타낸다.

[0158] 아울러, 진동 에너지는, 주파수 영역에서 에너지 값을 표현하는 PSD 함수를 활용하여, 상기한 [수학식 5]의 가속도를 이하의 [수학식 8]과 같이 나타낼 수 있다.

[0160] [수학식 8]

$$E_i(\omega_i) = \left(\overline{a_i(\omega_i)} \xi_i \right)^2$$

$$\xi_i^2 = \int_0^{T_1} |\cos(\omega_i t + \phi)|^2 dt = \frac{\omega_i T_i}{2}$$

[0161]

[0163] 상기한 [수학식 7]의 피로 손상도와 상기한 [수학식 8]의 진동 에너지는 에너지 등고선을 활용하여 단일 입력 스펙트럼 조건에서 이하의 [수학식 9]와 같이 나타낼 수 있으며, 그 세부적인 수식은 이하의 [수학식 10]과 같다.

[0165] [수학식 9]

$$\kappa(\omega_i) = \frac{D_i(\omega_i)}{E_i(\omega_i)^{\frac{-1}{2b}}}$$

[0166]

[0168] [수학식 10]

$$\kappa(\omega_i) = \frac{2^{\frac{-1}{2b}}}{\pi} \omega_i^{\left(1 + \frac{1}{2b}\right)} T_i^{\left(1 + \frac{1}{2b}\right)} S_0^{\frac{1}{b}} \| H_{m,i}(\omega_i) \|^{-\frac{1}{b}}$$

[0169]

[0171] 여기서, [수학식 10]의 에너지 등고선은 [수학식 5]의 입력 크기를 정규화시킨 다음 응력에 의한 피로 손상도를 계산한 값이다.

[0173] 또한, 상기한 관계식은 단일 스펙트럼에 대하여 나타낸 표현으로, 대상 시스템이 선형이라는 가정 아래 가진기로부터 구현 가능한 모든 주파수 대역으로 중첩이 가능하다.

[0175] 따라서 모든 주파수 대역에 대해 확장된 피로 손상도는 이하의 [수학식 11]과 같이 나타낼 수 있다.

[0177] [수학식 11]

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i T_i}{\pi} S_0^{\frac{1}{b}} \| H_{m,i}(\omega_i) \|^{-\frac{1}{b}} a_i(\omega_i)^{-\frac{1}{b}}$$

[0178]

[0180] 여기서, N은 이산화된 주파수 영역의 성분들의 합의 숫자이다.

[0182] 다음으로, 랜덤 주파수 입력 조건에 대하여 설명하면, 랜덤 주파수 성분이 입력 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대한 대표적인 피로 손상도 계산 방법에는 응력의 변형률(응력) PSD 선도를 활용한 확률 기반의 계산 방법이 있으며, 이는 가진 시간이 매우 불규칙한 환경에서 확률적으로 피로 손상도를 분석하는 기법이 필요한 대상에 주로 사용되고 있다.

[0184] 이에, 본 발명에서는, 에너지 등고선 기법을 활용하여 상기한 [수학식 11]의 손상도 계산식을 랜덤 주파수로 확장하는 방법을 제안하였다.

[0186] 즉, 단일 입력 주파수 성분 조건([수학식 7] 참조)에서 ω_i 주파수에 해당된 반복횟수는 이하의 [수학식 12]와 같다.

[0188] [수학식 12]

$$N_i = \frac{\omega_i T_i}{\pi}$$

[0189]

[0191] 여기서, 랜덤 주파수 입력조건은 모든 주파수 성분이 동시에 존재하는 가정이 성립하므로, ω_i 주파수와 관련된 성분은 해당 주파수 및 ω_i 보다 높은 주파수 성분들의 중첩에 의해 결정되며, 최대 크기 조건은 모든 조화 성분들이 모두 최대 크기를 가질 조건이 된다.

[0193] 따라서 ω_i 주파수와 관련된 최대 크기는 이하의 [수학식 13]과 같이 나타낼 수 있다.

[0195] [수학식 13]

$$M_{\max}(\omega_i) = \sum_i^N \| H_{m,i}(\omega_i) \| \overline{a_i}(\omega_i)$$

[0196]

[0198] 그러나 실제로 응답 형태로 나타나는 랜덤 신호의 크기는 이보다 작으며, 파고율(crest factor) 값에 따라 최대 피크 성분이 발생할 확률이 정해지고, 랜덤 신호의 제곱평균제곱근(root mean square, RMS) 값은 일정한 값을 가진다.

[0200] 응답 능력의 제곱평균제곱근 값이 σ_R 이고, 파고율이 C_f 라고 가정하면, 최대 크기의 기대값은 이하의 [수학식 14] 및 [수학식 15]와 같이 나타낼 수 있다.

[0202] [수학식 14]

$$\sigma_{\max} = M_{\max} \gamma$$

[0203]

[0205] [수학식 15]

$$\gamma = \frac{\sigma_R C_f}{M_{\max}}$$

[0206]

[0208] 이와 같은 조건에서 주파수에 따른 피로 손상도는 이하의 [수학식 16]으로 나타낼 수 있다.

[0210] [수학식 16]

$$D = \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i T_i}{\pi} S_0^{\frac{1}{b}} \gamma^{\frac{-1}{b}} \sum_{j=i}^N \left(\| H_{m,j}(\omega_j) \| \frac{-1}{b} \overline{a_j}(\omega_j)^{\frac{-1}{b}} \right)$$

[0211]

[0213] 여기서, N은 이산화된 주파수 영역의 성분들의 합인 숫자이다.

[0215] 계속해서, SOR(단일+랜덤) 주파수 입력조건에 대하여 설명하면, 2개의 주파수 성분이 복합적으로 작용하는 입력조건에 대한 피로 손상도를 계산하기 위해, 본 발명에서는, 각각의 입력조건에 대한 손상도 방법에 해당하는 [수학식 11]과 [수학식 15]를 활용하였다.

[0217] 즉, 상기한 바와 같이 하여 도출된 피로 손상도 방법들은, 입력 패턴이 다른 조건이지만 동일하게 주파수별로 손상도를 계산한 다음 중첩하는 형태로 도출되었으므로, SOR 상태에 대해서도 계산이 가능하다.

[0219] 만약, 조화 가진과 랜덤 가진이 주파수 ω_i 에 대해 각각 $T_{h,i}$, $T_{r,i}$ 만큼 인가된다고 가정하면, 상기한 [수학식 12]로부터 반복 횟수가 $N_{h,i}$, $N_{r,i}$ ($N_{h,i} < N_{r,i}$)로 계산된다.

[0221] 여기서, 랜덤 가진의 가진 주파수가 일반적으로 많은 이유는 전체 가진시간 동안 발생할 수 있는 가진 확률이 높기 때문이다.

[0223] $N_{h,i}$ 횟수 동안에 응력의 크기는 랜덤과 조화가진 크기가 중첩되며, 나머지 반복횟수 동안에는 랜덤 가진 크기만 영향을 주게 된다.

[0225] 따라서 해당 주파수 ω_i 에서 계산되는 피로 손상도는 이하의 [수학식 17]과 같이 나타낼 수 있다.

[0227] [수학식 17]

$$D(\omega_i) = N_{h,i} S_0^{\frac{1}{b}} \left[\left\| H_{m,i}(\omega_i) \right\|^{\frac{-1}{b}} \overline{a_i(\omega_i)}^{\frac{-1}{b}} + \gamma^{\frac{-1}{b}} \sum_{j=i}^N \left(\left\| H_{m,j}(\omega_j) \right\|^{\frac{-1}{b}} \overline{a_j(\omega_j)}^{\frac{-1}{b}} \right) \right] + (N_{r,i} - N_{h,i}) S_0^{\frac{1}{b}} \left\| H_{m,i}(\omega_i) \right\|^{\frac{-1}{b}} \overline{a_i(\omega_i)}^{\frac{-1}{b}}$$

[0228]

[0230] 따라서 상기한 바와 같은 내용으로부터, 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 구현할 수 있다.

[0232] 즉, 도 1을 참조하면, 도 1은 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이다.

[0234] 도 1에 나타낸 바와 같이, 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법은, 크게 나누어, 분석하고자 하는 진동환경에 대응하는 주파수 입력조건을 설정하는 단계(S10)와, 상기 단계에서 설정된 주파수 입력조건에 따라 대상물에 진동을 인가하여 응답 데이터로서 가속도 데이터를 취득하는 단계(S20)와, 상기 단계에서 얻어진 가속도 데이터에 근거하여, 가속도 기반의 유사 손상도(pseudo damage) 방법에 의해 상기 대상물의 피로 손상도를 계산하는 단계(S30)를 포함하여 구성될 수 있다.

[0236] 여기서, 상기한 주파수 입력조건을 설정하는 단계(S10)는, 필요에 따라 단일 주파수 입력조건, 랜덤 주파수 입력조건 및 상기한 두 가지 조건이 복합적으로 작용하는 SOR(단일 + 랜덤) 입력조건을 선택적으로 설정하여, 각각의 입력조건에 따라 대상물에 각각 서로 다른 다양한 진동 스펙트럼을 인가하도록 구성될 수 있다.

[0238] 또한, 가속도 데이터를 취득하는 단계(S20)는, 대상물에 가속도 측정장치를 부착하여 상기 단계에서 설정된 주

파수 입력조건에 따라 인가되는 진동에 따른 대상물의 가속도를 실시간으로 측정하여 수집하도록 구성될 수 있다.

[0240] 아울러, 상기한 피로 손상도를 계산하는 단계(S30)는, 상기한 [수학식 1] 내지 [수학식 17]을 참조하여 상기에 설명한 바와 같이 하여, 단일 주파수 입력조건, 랜덤 주파수 입력조건 및 SOR 입력조건에 따라 각각 피로 손상도를 계산하는 처리가 수행되도록 구성될 수 있다.

[0242] 즉, 상기한 피로 손상도를 계산하는 단계(S30)는, 단일 주파수 입력조건인 경우 [수학식 11]을 이용하여 피로 손상도를 계산하고, 랜덤 주파수 입력조건인 경우는 [수학식 16]을 이용하여 피로 손상도를 계산하며, SOR 입력조건인 경우는 [수학식 17]을 이용하여 피로 손상도를 각각 계산하도록 구성될 수 있다.

[0244] 더욱이, 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법은, 상기한 바와 같이 하여 계산된 피로 손상도를, 예를 들면, 시간 영역에서의 분석방법 등과 같이, 기존의 방법에 의해 구해진 피로 손상도와 비교하여 오차를 검증하는 검증단계를 더 포함하여 구성될 수 있다.

[0246] 따라서 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 하여 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 컴퓨터나 전용의 하드웨어에 의해 실행시킴으로써, 가진 상태에서 측정된 가속도 데이터만을 활용하여 랜덤 및 조화 가진 상태뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도의 계산이 모두 가능해진다.

[0248] 계속해서, 상기한 바와 같이 하여 구성되는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 성능을 검증하기 위해, 단순 시편을 활용한 진동 시험을 실시하여 기존의 방법들과 비교한 결과에 대하여 설명한다.

[0250] 즉, 본 발명자들은, 진동 시험 과정에서 측정된 응답 데이터를 바탕으로 서로 다른 피로 손상도를 비교 평가하기 위해 단축 가진 환경을 구축하고 노치가 있는 단순 시편을 준비하였으며, 이때, 시험 환경 및 분석에 사용된 센서들은 기존의 연구 내용과 동일하게 구성하였다.

[0252] 더 상세하게는, 도 2 및 도 3을 참조하면, 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 성능을 검증하기 위한 진동 시험에 사용된 노치가 있는 단순 시편의 전체적인 구성을 개략적으로 나타내는 도면이고, 도 3은 실제 제작된 시편의 모습을 개략적으로 나타내는 도면이다.

[0254] 도 2에 나타난 바와 같이, 본 발명의 실시예에 있어서, 노치가 있는 단순 시편은 S45C를 사용하였으며, 이에 따른 S-N 선도의 물리량은 기울기 -0.0806 , 응력 절편 664.5MPa 이었고, 시편의 형상은 가진기의 최대 주파수 대역(MODAL 110 Exciter/MB dynamics)인 $5,000\text{Hz}$ 내에 최소 1개 이상의 공진점을 보유할 수 있도록 설계하였다.

[0256] 또한, 상기한 바와 같이 구성되는 단순 시편을 이용하여 별도의 모달 시험(Test.Lab/LMS)을 통해 시편의 동적 특성을 확인해 본 결과, 1차 공진점은 1162.7Hz , 감쇠 값이 0.55% 이므로 최대 가진 주파수 범위 내에 시편의 공진이 포함되어 있음을 알 수 있었다.

- [0258] 아울러, 상기한 바와 같이, 진동 과정에서 발생된 시편의 피로 손상도를 계산하기 위해서는 응답 가속도 및 변형률(응력) 신호가 필요하므로, 도 3에 나타낸 바와 같이, 시편의 한쪽 면에 가속도 센서(1A)를 부착하였으며, 다른 면의 노치 중앙에 스트레인 게이지(1S)를 부착하여 변형률 값을 계측하였다.
- [0260] 여기서, 가진기가 Z축의 단축 방향으로 가진되므로 계측되는 가속도 및 변형률 데이터는 아웃 오브 플레인(out of plane) 방향의 응답 값에 해당하며, 부착된 센서 신호들은 도 3에 나타낸 바와 같다.
- [0262] 또한, 상기한 바와 같이 구성되는 단순 시편을 이용하여 단축 가진 시험을 진행하기 위해 일반적으로 사용되는 가진 프로파일은 모든 주파수 대역을 동시에 인가하는 랜덤, 하나의 주파수 성분을 인가하는 조화 성분으로 나눌 수 있다.
- [0264] 이에, 본 발명의 실시예에서는, 랜덤 및 조화 성분에 해당하는 대표적인 가진 프로파일을 구성하고, 이를 활용하여 다양한 가진 스펙트럼 패턴에 따른 피로 손상도를 분석하기 위해 랜덤, 조화 성분으로 이루어진 각각의 가진 시험 이외에 2가지 패턴을 동시에 인가하는 SOR 진동 시험을 추가적으로 진행하였다.
- [0266] 즉, 도 4를 참조하면, 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 성능을 검증하기 위한 진동 시험에 적용된 진동 프로파일의 구체적인 내용을 표로 정리하여 나타낸 도면이다.
- [0268] 따라서 도 3에 나타낸 바와 같이 2가지 진동 프로파일을 이용하여 랜덤, 조화 및 SOR 시험의 순으로 차례로 진동 시험을 진행하고, 가진 시험을 진행하는 동안 도 3에 나타낸 바와 같이 시편에 각각 부착된 가속도 센서(1A)와 스트레인 게이지(1S)를 통하여 가속도 및 변형률 응답 데이터를 계측하였다.
- [0270] 여기서, 모든 시험은 최소 3번을 진행하여 시험 과정에서 발생하는 오차를 반영할 수 있도록 하였다.
- [0272] 계속해서, 상기한 바와 같은 진동 시험을 통한 피로 손상도의 계산에 대하여 설명한다.
- [0274] 먼저, 시간 영역에서의 피로 손상도 계산은, 시간 영역의 계측 데이터를 활용하여 전통적인 카운트 방식인 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak counting) 방법으로 변형률, 가속도 데이터에 대해 구간별 반복횟수를 계산하였으며, 이때, 3개의 가진 스펙트럼 패턴에 대해 각각 횟수를 계산하였고, 동일 모드에 대해 3번의 시험에 대한 결과를 평균하였다.
- [0276] 즉, 도 5를 참조하면, 도 5는 시간 영역의 계측 데이터를 활용하여 기존의 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak counting) 방법으로 변형률 및 가속도 데이터에 대한 구간별 반복횟수를 계산한 결과를 그래프로 나타내는 도면이다.
- [0278] 더 상세하게는, 도 5에 나타낸 바와 같이, 가속도 및 변형률에 대해 계산된 횟수를 분석한 결과, SOR 조건과 랜덤의 경우는 유사한 분포를 보이고 있으나, 조화 함수의 경우는 다른 분포 양상이 나타났음을 확인할 수 있다.
- [0280] 또한, 이러한 결과는 가속도 및 변형률 모두 유사한 경향성을 나타내었으며, 랜덤 가진의 경우 높은 크기 구간에서 급격하게 반복 횟수가 줄어드는 반면, 조화 가진과 SOR의 경우에는 상대적으로 높은 크기 구간에서 많은

반복 횟수를 가지고 있음을 확인할 수 있다.

- [0282] 특히, SOR의 경우, 조화 성분과 랜덤 성분의 크기가 중첩되어 최대 크기 대역에서 다른 가진 조건들 대비 반복 횟수가 많았음을 확인할 수 있다.
- [0284] 여기서, 변형률 기반의 피로 손상도의 경우 재료 특성에 의해 결정된 S-N 선도를 그대로 사용하므로 피로 손상도 값은 유일하나, 가속도 기반의 피로 손상도는 가상의 S-N 선도를 사용하므로 어떤 기울기 값을 사용하는가에 따라 손상도 값이 달라질 수 있다.
- [0286] 즉, 도 6을 참조하면, 도 6은 변형률 기반 손상도 및 3가지 다른 기울기에 대한 가속도 기반의 손상도를 표로 정리하여 나타낸 도면이다.
- [0288] 도 6에 나타난 바와 같이, 변형률(또는 응력)의 경우 SOR 시험 모드가 피로 손상도 측면에서 랜덤 또는 조화 가진 형태의 경우보다 가혹하였으나, 가속도 기반의 가혹도의 경우 기울기에 따라서 랜덤 또는 조화 가진의 가혹도가 매우 다른 양상을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.
- [0290] 이는, 상기한 도 5에서 조화 성분의 주요 횟수가 상대적으로 낮은 곳에 집중적으로 분포하고 있음으로 인해 기울기의 절대값이 증가할수록 상대적으로 손상도의 합이 줄어들며, 상대적으로 랜덤 가진의 경우 동일 조건에서 손상도의 값이 상대적으로 증가하는 것에 기인한다.
- [0292] 따라서 가속도 기반의 피로 손상도는 결정되는 기울기에 따라 매우 민감한 결과를 나타냄을 알 수 있다.
- [0294] 계속해서, 주파수 영역에서의 피로 손상도 분석에 대하여 설명하면, 주파수 영역의 피로 손상도 계산과정에서도 동일한 S-N 선도의 데이터가 사용되었으며, 상기한 [수학식 11], [수학식 15], [수학식 16]을 활용하여 서로 다른 입력 스펙트럼 패턴에 따라 피로 손상도를 계산하였다.
- [0296] 여기서, 상기한 시간 영역에서의 분석방법과의 차이는 반복 횟수를 계산하는 과정이 주파수 영역이라는 것이며, 또한, 가속도 데이터의 경우에는 응력 데이터로 변환하기 위해 2개 물리량 사이의 주파수 응답 함수를 활용하였다.
- [0298] 즉, 도 7을 참조하면, 도 7은 변형률 및 가속도 데이터를 활용하여 주파수 영역에서 계산된 피로 손상도를 표로 정리하여 나타낸 도면이다.
- [0300] 도 7에 나타난 바와 같이, 스트레인게이지를 직접 활용한 피로 손상도와 가속도 데이터를 활용한 간접적인 피로 손상도는 기존 연구들에서의 발표내용과 유사하게 랜덤 가진의 경우 103.0%, 조화가진 81.5% 및 SOR 조건에서 52.6%의 상대오차(시간영역 데이터 기준)를 나타내었음을 확인할 수 있다.
- [0302] 여기서, 물론, 동일한 변형률 데이터를 시간 영역과 주파수 영역에서 직접 비교한 상대오차는 72.7%, 조화가진 81.1% 및 SOR 조건에서 42.1%이므로 좀 더 오차 범위가 축소되었음을 확인할 수 있으며, 이는, 피로 손상도가 지수함수인 점을 감안할 때 수용 가능한 오차 범위이다.

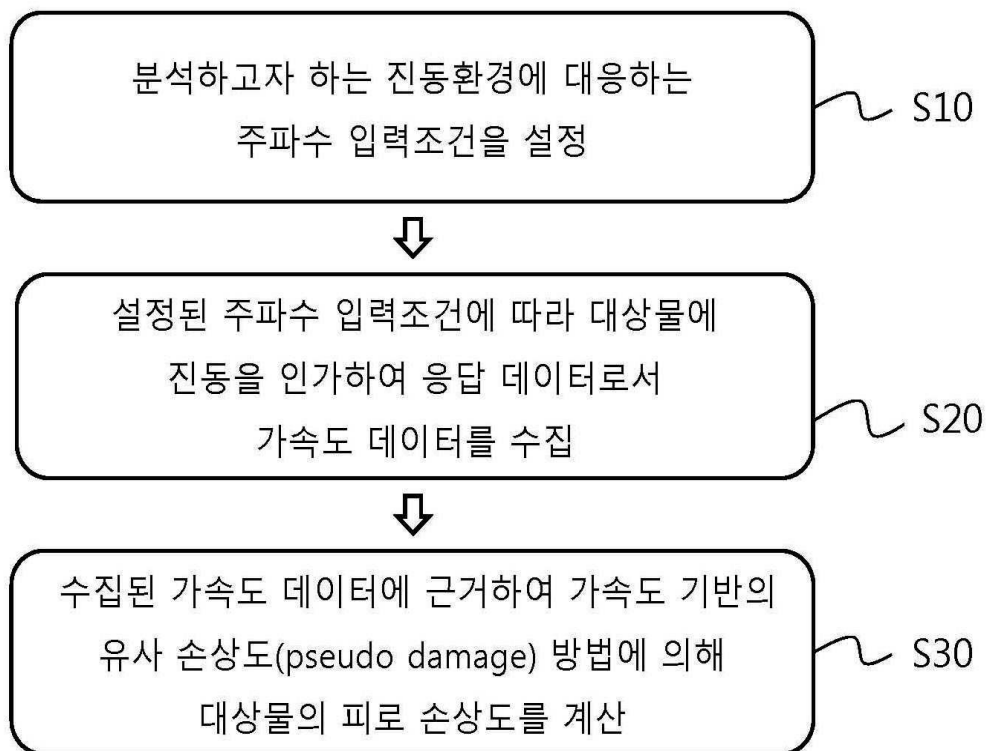
- [0304] 또한, 랜덤 가진 등에서 상대적으로 오차가 많이 발생한 이유는 시간 영역의 데이터의 파고율(crest factor)을 진동 가진기에서 정확하게 제어하는데 한계가 있기 때문에 주파수 영역에서 평균된 스펙트럼의 크기가 실제 시간 영역에서 발생하는 불규칙적인 크기 성분을 하나의 성분으로 대응하는데 한계가 있기 때문이다.
- [0306] 상기한 바와 같은 결과로부터, 랜덤 가진에 따른 피로 손상도는 가장 작은 값을 보여주고 있으나, 조화가진 성분과 동시에 가진원으로 작용하는 SOR 시험 모드에서는 기여도가 높아짐을 확인할 수 있으며, 이러한 결과는, 상기한 [수학식 16]에서 조화 가진과 랜덤 가진이 동시에 일어나는 조건에서 응답 크기가 중첩이 되어 증가하였기 때문이다.
- [0308] 즉, SOR 조건에서 랜덤 성분만을 얻어내기 위해 가속도의 주파수 성분을 얻어내는 과정에서 4096 윈도우 크기에서 90%로 중첩시켜 평균하여 특정 구간에서 발생하는 조화 가진의 주요 성분들을 제거하였으며, 반면, 조화 가진의 주요 성분을 얻어내야 하는 경우 동일 윈도우 크기에서 평균 대신 피크 홀드(peak hold) 옵션을 사용하여 중첩시켜 최대 크기 성분들을 추출하였다.
- [0310] 상기한 바와 같이, 본 발명의 실시예에서는, 복합 스펙트럼 진동 환경에 대한 피로 손상도 계산 방법들을 비교하기 위해 노치가 있는 단순한 시편을 사용하여 기존의 시험 방법인 랜덤, 조화 및 SOR 가진 조건에 대하여 진동시험을 수행하였으며, 시간 영역의 변형률 및 가속도 데이터를 활용하여 피로 손상도를 계산하고, 주파수 영역에서도 동일 데이터들을 주파수 영역으로 변환하여 유사한 계산 방법을 적용하였다.
- [0312] 그 결과, 3가지 가진 조건에 대하여 주파수 영역에서 계산된 피로 손상도는 대체적으로 유사한 값을 도출하여 신뢰성이 있음을 알 수 있었으며, 따라서 본 발명에 따라 주파수 영역에서 가속도 데이터를 활용하여 피로 손상도를 계산하는 방법은, 종래기술의 다른 방법들과 비교하여 계산의 효율성 및 다양한 가진 스펙트럼 조건에 활용 가능한 장점으로 전통적인 시간 영역의 계산방법을 대체할 수 있을 것으로 기대된다.
- [0314] 따라서 상기한 바와 같이 하여 본 발명에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 구현할 수 있다.
- [0316] 또한, 상기한 바와 같이 하여 본 발명에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 구현하는 것에 의해, 본 발명에 따르면, 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진조건에서 가속도 데이터를 활용한 랜덤(random) 가진상태에서 피로 손상도를 계산하는 방법을 제시하고, 이를 기존의 조화(harmonic) 가진 상태에서의 피로도 계산방법과 연계하도록 구성되는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법이 제공됨으로써, 자동차 부품 등과 같은 기계 시스템의 진동시험을 위한 주파수 영역에서의 피로 손상도 계산방법에 있어서, 시간 영역에서 피로 손상도를 예측하기 위해 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정된 후 제로 크로싱 피크 카운트(zero-crossing peak count) 방법 등을 이용하여 피로 손상도를 계산하는 기존의 방법들은 정확하기는 하나 불규칙한 랜덤신호가 가진원으로 작용하는 기계 시스템에 대하여는 시간 영역의 방대한 양의 데이터를 처리하기에 어려움이 있고, 이러한 난점을 해소하기 위해 주파수 영역에서 계산하는 종래의 방법들은 조화 가진에만 적용 가능한 한계가 있었던 종래기술의 피로 손상도 계산방법들의 문제점을 해결할 수 있다.
- [0318] 아울러, 본 발명에 따르면, 상기한 바와 같이 랜덤 및 조화 가진 상태뿐만 아니라 주파수 영역에서 선형 시스템이 서로 다른 주파수 스펙트럼을 나타내는 SOR(sine-on-random) 가진 조건에 노출된 상태에서의 피로 손상도의 계산이 모두 가능하도록 구성됨으로써, 다양한 가진 상황에서 발생하는 응답 가속도와 응답 변형률 사이의 선형성이 보장되는 어떠한 선형 시스템에 대하여도 적용이 가능하며, 가진 상태에서 측정된 가속도 데이터만을 활용하여 랜덤, 조화 및 SOR 상태에서 모두 적용이 가능한 장점을 가지는 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한

주파수 영역의 피로 손상도 계산방법을 제공할 수 있다.

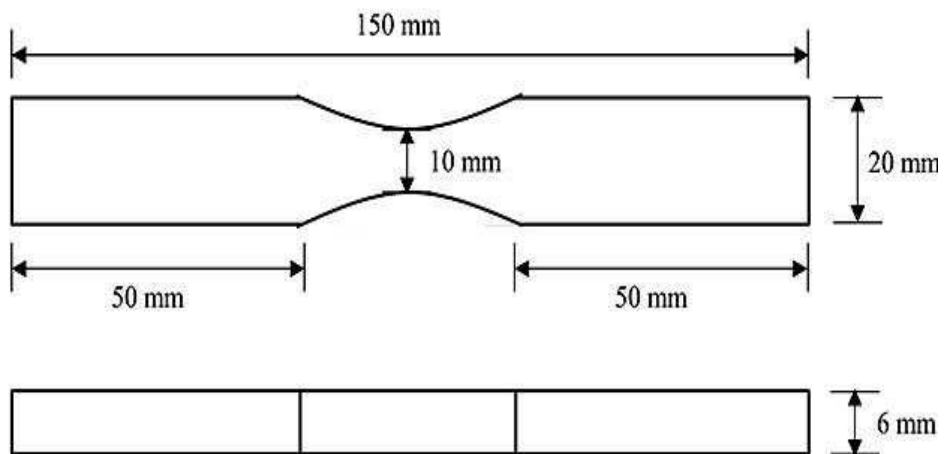
[0320] 이상, 상기한 바와 같은 본 발명의 실시예를 통하여 본 발명에 따른 다양한 진동 스펙트럼 패턴에 대응 가능한 주파수 영역의 피로 손상도 계산방법의 상세한 내용에 대하여 설명하였으나, 본 발명은 상기한 실시예에 기재된 내용으로만 한정되는 것은 아니며, 따라서 본 발명은, 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 설계상의 필요 및 기타 다양한 요인에 따라 여러 가지 수정, 변경, 결합 및 대체 등이 가능한 것임은 당연한 일이라 하겠다.

도면

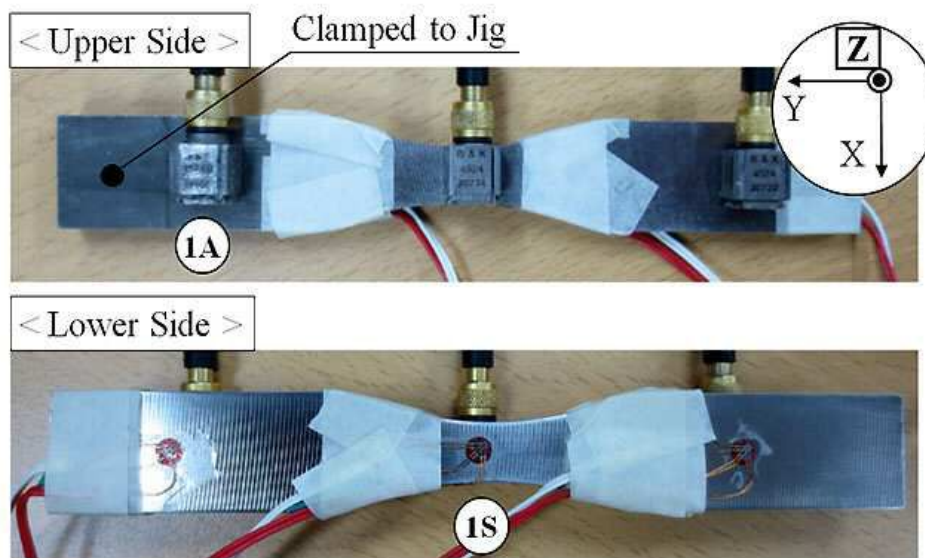
도면1



도면2



도면3



도면4

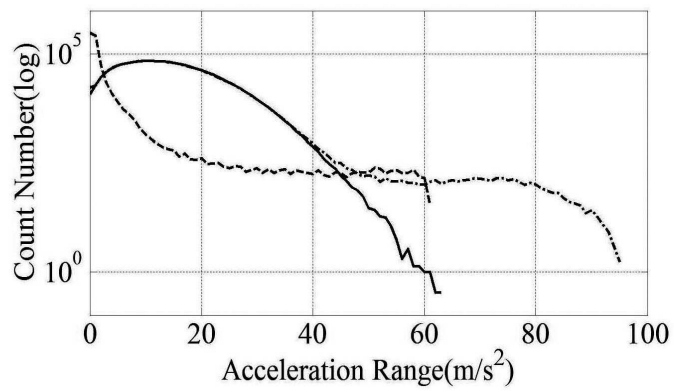
Vibration profile for random testing

No.	Frequency(Hz)	Magnitude(G^2/Hz)
1	20	0.005
2	100	0.005
3	4,000	0.001
Duration(s)		424

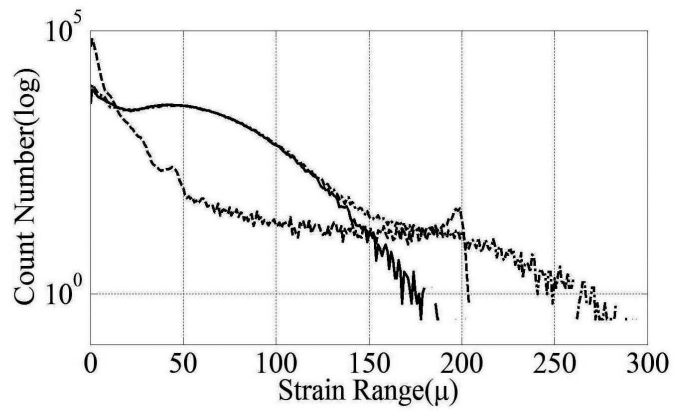
Vibration profile for sinusoidal testing

No.	Frequency(Hz)	Magnitude(G)
1	30	0.5
2	100	1.0
3	4,000	1.0
Duration(s)/Sweep(Oct/min)		424/1

도면5



(a) Acceleration



(b) Strain

— random - - - - harmonic - . - sine-on-random

도면6

Accumulated damage in a time domain

Response	Mode	#1	#2	#3	Average
Strain (time)	Random	3.9E-14	3.5E-14	2.4E-14	3.3E-14
	Harmonic	5.3E-13	5.2E-13	5.4E-13	5.3E-13
	SOR	5.7E-12	2.3E-12	3.3E-12	3.8E-12
Acc. #1 ($b=-1/3$)	Random	5.7E-5	5.7E-5	5.6E-5	5.7E-5
	Harmonic	5.4E-6	5.6E-6	5.4E-6	5.5E-6
	SOR	7.0E-5	6.8E-5	6.9E-5	6.9E-5
Acc. #2 ($b=-1/6$)	Random	8.3E-15	8.5E-15	8.3E-15	8.4E-15
	Harmonic	5.2E-15	5.4E-15	5.2E-15	5.3E-15
	SOR	4.7E-14	4.6E-14	4.3E-14	4.5E-14
Acc. #3 ($b=-1/9$)	Random	2.3E-24	2.5E-24	2.5E-24	2.4E-24
	Harmonic	6.3E-24	6.7E-24	6.2E-24	6.4E-24
	SOR	1.4E-22	1.4E-22	1.2E-22	1.3E-22

도면7

Accumulated damage in a frequency domain

Response	Mode	#1	#2	#3	Average
Strain (freq.)	Random	5.8E-14	6.0E-14	5.4E-14	5.7E-14
	Harmonic	1.0E-13	9.8E-14	1.0E-13	1.0E-13
	SOR	2.3E-12	2.2E-12	2.2E-12	2.2E-12
Acc. (freq.)	Random	6.8E-14	6.9E-14	6.3E-14	6.7E-14
	Harmonic	1.0E-13	9.6E-14	9.9E-14	9.8E-14
	SOR	2.6E-12	1.0E-12	1.7E-12	1.8E-12