



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0041396
(43) 공개일자 2023년03월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01N 3/08 (2006.01) G01N 3/06 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01N 3/08 (2013.01)
G01N 3/066 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2021-0124955
(22) 출원일자 2021년09월17일
심사청구일자 2021년09월17일

(71) 출원인
울산과학기술원
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
(72) 발명자
박영빈
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
이인용
울산광역시 울주군 언양읍 유니스트길 50
노형도
경상남도 창원시 성산구 대정로 142 대방대동아파
트 104동 804호
(74) 대리인
특허법인 피씨알

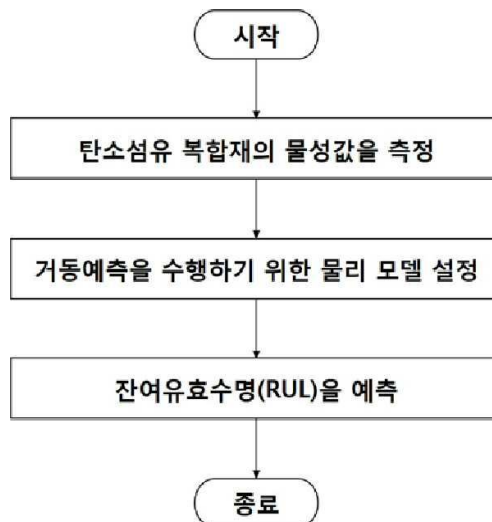
전체 청구항 수 : 총 18 항

(54) 발명의 명칭 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법 및 진단 장치

(57) 요약

본 발명은, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 및 진단 방법에 관한 것으로, 특히 탄소섬유 복합재의 복잡한 거동을 예측하기 위해 물성 거동의 선택화를 적용하여 거동의 빠른 예측 및 정확한 예측을 수행하기 위해 기술이다. 본 발명은, 파손 또는 가해지는 기계적 응력에 따라 탄소섬유 복합재의 변화되는 전기 저항값을 측정하기 위해 전극을 지정된 위치에 설치하는 단계; 상기 전극에서 측정된 전기 저항값의 변화를 통해 상기 탄소섬유 복합재의 예측 구간을 분할하고 상기 예측 구간에 따라 설정되는 수식을 달리하여 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위한 물리 모델을 설정하는 단계; 및 상기 물리 모델에 새로운 탄소섬유 복합재의 입력 데이터를 입력하여 상기 새로운 탄소섬유 복합재의 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 단계를 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 및 진단 방법을 제공한다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

G01N 2203/0075 (2013.01)

G01N 2203/021 (2013.01)

G01N 2203/0212 (2013.01)

G01N 2203/0617 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711129688
과제번호	2017R1A5A1015311
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	집단연구지원(R&D)
연구과제명	산업수요기반 고효율·안전 항공핵심기술 연구센터
기 여 율	1/1
과제수행기관명	경상대학교
연구기간	2021.03.01 ~ 2022.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

가해지는 기계적 하중에 의해 변화되는 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 단계;

상기 탄소섬유 복합체에 가해지는 기계적 하중에 대한 응력 분포 시뮬레이션을 기초로 상기 물성값의 거동을 예측하는 예측 구간을 분할하고, 각 예측 구간별로 설정되는 열화 함수를 달리하여 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위한 물리 모델을 설정하는 단계; 및

상기 물리 모델에 상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 입력하고 파티클 필터를 이용하여 상기 탄소섬유 복합재의 잔여유�효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 단계를 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 단계는,

상기 탄소섬유 복합재의 소정 위치에 복수의 전극을 설치하여 이들 전극 사이의 전기 저항값을 측정하는, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 3

제 2 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 단계는,

Dual Cantilever Beam test(DCB 테스트)로 수행되며, 상기 기계적 하중에 따라 크랙이 진행되는 방향으로 적어도 하나 이상 전극의 위치를 선정하여 설치하는, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 물리 모델을 설정하는 단계는,

상기 탄소섬유 복합재의 물성값의 상기 크랙의 길이에 따른 변화 정도인 기울기값에 따라 적어도 하나의 예측 구간을 설정하는 단계; 및

상기 예측 구간의 물성값의 분포 형태 또는 분포 측정값을 분석하여 상기 예측 구간의 물성값을 예측할 수 있는 미정 계수(undetermined multiplier)가 포함된 열화 함수를 설정하는 단계를 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합재의 기울기값은,

상기 탄소섬유 복합체의 섬유 적층 조건, 섬유 충진율 및 섬유의 종류 중 적어도 어느 하나 이상에 따라 변화되는 것을 특징으로 하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합체의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 6

제 4 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합체의 기울기값이 양수에서 음수로 바뀌거나 음수에서 양수로 바뀌는 경우, 예측 구간을 구분하여 나누는, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합체의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 7

제 4 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합체의 기울기값이 이전 예측 구간의 기울기값과 비교하여 2배 차이가 나는 경우, 예측 구간을 구분하여 나누는, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합체의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 8

제 4 항에 있어서,

상기 예측 구간별로 상기 열화 함수를 상이하게 설정하거나 상기 열화 함수에 포함되는 미정 계수의 수치 한정 범위를 상이하게 설정하는, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합체의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 9

제 1 항에 있어서,

상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 단계는,

상기 물성값의 사전 분포에서 사후 분포로 변화되는 과정;

상기 예측 구간에서의 예측 대상인 모델 파라미터와 열화 상태들이 측정된 데이터들로 인하여 갱신되는 과정; 및

상기 사후 분포를 사전 분포로 지정하기 전 가중치로 리샘플링하여 예측 정확도를 높이는 과정을 포함하는 파티클 필터링을 반복하는 과정을 더 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합체의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 10

제 1 항에 있어서,

상기 물리 모델을 설정하는 단계에서는,

상기 열화 함수의 미정 계수를 추정하기 위해 상기 탄소섬유 복합체의 저항 변화값으로 하기 수학식 1과 같이 열화 함수를 가정하며,

상기 탄소섬유 복합체의 잔여유효수명을 예측하는 단계에서는

파티클 필터 과정의 반복에 따라 상기 열화 함수의 미정 계수를 추정하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합체의 건전성 예지 진단 방법.

[수학식1]

Piezoresistivity property: $\frac{dR}{R} = \alpha(x)^n$

(여기서, x : 시간 또는 크랙 길이, R :전기 저항, α, n :열화함수 파라미터(미정 계수)를 의미함.)

청구항 11

제 10 항에 있어서,

상기 열화 함수는,

수학식2와 같은 선형 함수 또는 수학식 3과 같은 지수 함수를 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

[수학식2]

$$dr = \alpha \times \epsilon^b \times dx$$

[수학식3]

$$dr = \alpha \times \epsilon^{bx} \times dx$$

(여기서, x : 인장 시험시간, ϵ : 변형률(strain), α, b :열화함수 파라미터)

청구항 12

제 1 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합재는,

탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)을 포함하고,

상기 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)은 4개의 예측 구간으로 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)의 예측이 수행되는, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 13

제 1 항에 있어서,

상기 탄소섬유 복합재는,

하이브리드 섬유강화 플라스틱(HFRP:Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)를 포함하고,

상기 하이브리드 섬유강화 플라스틱(HFRP:Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)은 2개의 예측 구간으로 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)의 예측이 수행되는 것을 특징으로 하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법.

청구항 14

제 1 항 내지 제 13 항 중 어느 한 항의 방법을 프로그램으로 구현하기 위한 프로그램이 기록된 컴퓨터로 판독 가능한 기록매체.

청구항 15

가해지는 기계적 하중에 의해 진행되는 크랙의 길이에 따라 변화되는 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 물성값 측정 유닛;

상기 탄소섬유 복합재에 가해지는 기계적 하중에 대한 응력 분포 시뮬레이션을 기초로 상기 물성값의 거동을 예측하는 예측 구간을 분할하고, 각 예측 구간별로 설정되는 열화 함수를 달리하여 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위한 물리 모델을 설정하는 물리 모델 설정 유닛; 및

상기 물리 모델에 상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 입력하고 파티클 필터를 이용하여 상기 탄소섬유 복합재의 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 잔여유효수명 예측 유닛을 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 장치.

청구항 16

제 15 항에 있어서,

상기 물성값 측정 유닛은,

Dual Cantilever Beam test(DCB 테스트)로 수행되며, 상기 기계적 하중에 따라 크랙이 진행되는 방향으로 적어도 하나 이상 전극의 위치를 선정하여 설치하여 이들 전극 사이의 전기 저항값을 측정하는 것을 특징으로 하는 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 장치.

청구항 17

제 15 항에 있어서,

상기 물리 모델 설정 유닛은,

상기 탄소섬유 복합재의 물성값의 상기 크랙의 길이에 따른 변화 정도인 기울기값에 따라 적어도 하나 이상의 예측 구간을 설정하여 상기 예측 구간의 저항 변화값을 예측할 수 있는 미정 계수(undetermined multiplier)가 포함된 열화 함수로부터 각 계수를 추정해나가는 과정을 통해 물리 모델을 설정하는 것을 특징으로 하는 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 장치.

청구항 18

제 17 항에 있어서,

상기 물리 모델 설정 유닛은,

탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) 또는 하이브리드 섬유강화 플라스틱(HFRP:Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)으로 구성된 탄소섬유 복합재의 종류에 따라 상기 예측 구간을 각각 4개 또는 2개로 설정하여 상기 물리 모델을 설정하는 것을 특징으로 하는 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 장치.

발명의 설명

기술 분야

[0001]

본 발명은, 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법 및 진단 장치에 관한 것으로, 특히 탄소섬유 복합재의 복잡한 거동을 예측하기 위해 물성 거동의 섹션화를 적용하여 거동의 빠른 예측 및 정확한 예측을 수행하기 위한 기술이다.

배경 기술

- [0003] 일반적으로 구조물의 건전성을 진단하는 데 사용되는 기법은, 육안 검사, 음향 반출(Acoustic emission, AE), 와전류(Eddy current), 초음파(Ultrasonics), X선 투과시험(X-ray radiography) 등을 포함하고, 대부분의 방법들은 검사 인력과 장비를 적절한 시기에 투입하여 정기적으로 검사를 수행한다. 이러한 방법들은 구조물의 상태와 상관없이 정해진 일정에 맞추어 감사를 수행하게 되므로, 필요 이상의 인건비가 소요되고, 검사로 인한 구조물의 사용 중단 시간으로 인해 손실이 발생함에 따라 근래에는 내장형 센서들이 도입되고 있다. 상기 내장형 센서들은 세라믹 기반 압전 센서, 스트레인 게이지 등이 포함된다. 상기 내장형 센서들을 설치하고 측정 데이터를 얻어 구조물의 건전성을 감시하는 기술이 있다.
- [0004] 최근에는 구조물의 건전성을 감시하는 것으로부터 나아가 구조물의 거동을 예지하여 해당 구조물의 잔여유효수명을 예측하는 구조 건전성 예지 및 진단기술(Prognostics and Health Management; PHM)이 제안되고 있다.
- [0005] 이러한 PHM의 경우, 데이터 구동 방식(Data-driven PHM; DD PHM)과 물리 기반 방식(Physics Based PHM; PB PHM)이 있다. 전자의 경우 Feed Forward Neural Network를 이용하여 측정데이터와 파손과의 연관성을 연구하며, 별다른 수식없이 예측이 가능하나, 데이터의 양이 증가함에 따라서 정확도가 증가되며 데이터의 질이 중요하기 때문에 많은 데이터양과 상대적으로 오랜 트레이닝 시간이 걸릴 수 있다. 후자의 경우, 물리식의 계수와 파손과의 연관성 연구하며, 간단한 수식 즉 물리식을 가정하여 예측하며 물리적인 매커니즘에 대한 전문성을 구비하고 있다면 더 정확한 예측을 가능하게 한다.
- [0006] 이와 관련, 종래의 한국공개특허 제10-2020-0069101호는 이미지 프로세싱 시스템으로부터 제공되는 이미지 처리를 통한 진동 정보를 받아 건전성 예측 진단(Prognosis Health Management)을 하여 진동 분석의 정확도 및 정밀성을 높일 수 있도록 한 비전기반 하이브리드 건전성 예측 진단 시스템 기술을 개시하고 있다.
- [0007] 다만, 종래의 기술은 도 1 및 도 2에 기재된 바와 같이, 복잡한 거동을 예측하는 경우 잘못된 예측을 하는 문제점이 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0009] (특허문헌 0001) 한국공개(등록)특허 제10-2020-0069101호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은 복합재의 잔존 수명 예측과 같은 복잡한 거동을 예측하는 경우 발생할 수 있는 PHM(Prognosis Health Mangement)의 한계를 개선하기 위해 예측 구간을 분할하고 상기 예측 구간에 따라 설정되는 수식을 달리하여 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위한 물리 모델을 생성하는 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 및 진단 방법을 제공하는 것을 목적으로 한다.

과제의 해결 수단

- [0012] 상기 목적을 달성하기 위하여 본 발명은, 가해지는 기계적 하중 또는 진행되는 크랙의 길이에 따라 변화되는 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 단계; 상기 탄소섬유 복합체에 가해지는 기계적 하중에 대한 응력 분포 시뮬레이션을 기초로 상기 물성값의 거동을 예측하는 예측 구간을 분할하고, 상기 예측 구간에 따라 설정되는 열화 함수를 달리하여 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위한 물리 모델을 설정하는 단계; 및 상기 물리 모델에 상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 입력하고 파티클 필터를 이용하여 상기 탄소섬유 복합재의 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 단계를 포함하는 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 진단 방법을 제공한다.
- [0013] 실시 예에 따라, 상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 단계는, 상기 탄소섬유 복합재의 소정 위치에 복수의 전극을 설치하여 이들 전극 사이의 전기 저항값을 측정할 수 있다.

- [0014] 실시 예에 따라, 상기 탄소섬유 복합체의 물성값을 측정하는 단계는, Dual Cantilever Beam test(DCB 테스트)로 수행되며, 상기 기계적 하중에 따라 크랙이 진행되는 방향으로 적어도 하나 이상 전극의 위치를 선정하여 설치될 수 있다.
- [0015] 실시 예에 따라, 상기 물리 모델을 설정하는 단계는, 상기 탄소섬유 복합체의 물성값의 시간에 따른 변화 정도인 기울기값에 따라 적어도 하나 이상의 예측 구간을 설정하는 단계; 및 상기 예측 구간의 물성값의 분포 형태 또는 분포 측정 값을 분석하여 상기 예측 구간의 저항 변화값을 예측할 수 있는 미정 계수(undetermined multiplier)가 포함된 열화 함수를 설정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0016] 실시 예에 따라 상기 탄소섬유 복합체의 기울기값은, 상기 탄소섬유 복합체의 섬유 적층 조건, 섬유 충진을 및 섬유의 종류 중 적어도 어느 하나 이상에 따라 변화될 수 있다.
- [0017] 실시 예에 따라, 상기 탄소섬유 복합체의 기울기값이 양수에서 음수로 바뀌거나 음수에서 양수 혹은 양수에서 음수로 바뀌는 경우, 예측 구간을 구분하여 나눌 수 있다.
- [0018] 실시 예에 따라 상기 탄소섬유 복합체의 기울기값이 이전 예측 구간의 기울기값과 비교하여 2배 이상 증가한 경우, 예측 구간을 구분하여 나눌 수 있다.
- [0019] 실시 예에 따라, 상기 예측 구간별로 상기 열화 함수를 상이하게 설정하거나 상기 열화 함수에 포함되는 미정 계수의 수치 한정 범위를 상이하게 설정할 수 있다.
- [0020] 실시 예에 따라, 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 단계는, 상기 물성값의 사전 분포에서 사후 분포로 변화되는 과정; 상기 예측 구간에서의 예측 대상인 모델 파라미터와 열화 상태들이 측정된 데이터들로 인하여 갱신되는 과정; 및 상기 사후 분포를 사전 분포로 지정하기 전 가중치로 리샘플링하여 예측 정확도를 높이는 과정을 포함할 수 있다.
- [0021] 실시 예에 따라, 상기 물리 모델을 설정하는 단계에서는, 상기 열화 함수의 미정 계수를 추정하기 위해 상기 탄소섬유 복합체의 저항 변화값으로 하기 수식 1과 같이 열화 함수를 가정하며, 상기 탄소섬유 복합체의 잔여유효수명을 예측하는 단계에서는 파티클 필터 과정의 반복에 따라 상기 열화 함수의 미정 계수를 추정할 수 있다.
- [0022] [수학식1]
- [0023] Piezoresistivity property: $\frac{dR}{R} = \alpha(x)^n$
- [0024] (여기서, x : 시간 또는 크랙 길이, R: 전기 저항, a,n: 열화함수 파라미터(미정 계수)를 의미함.)
- [0025] 실시 예에 따라, 상기 열화 함수는, 수식식2와 같은 선형 함수 또는 수식식 3과 같은 지수 함수를 포함할 수 있다.
- [0026] [수학식2]
- [0027] $dr = \alpha \times \epsilon^b \times dx$
- [0028] [수학식3]
- [0029] $dr = \alpha \times \epsilon^{bx} \times dx$
- [0030] (여기서, x: 인장 시험시간, ε: 변형률(strain), a,b: 열화함수 파라미터)
- [0031] 실시 예에 따라, 상기 탄소섬유 복합체는, 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)을 포함하고, 상기 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)은 4개의 예측 구간으로 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)의 예측이 수행될 수 있다.
- [0032] 실시 예에 따라, 상기 탄소섬유 복합체는, 하이브리드 섬유강화 플라스틱(HFRP: Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)를 포함하고, 상기 하이브리드 섬유강화 플라스틱(HFRP: Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)은 2개의 예측 구간으로 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)의 예측이 수행될 수 있다.
- [0033] 또한 본 발명은, 상술한 어느 한 방법을 프로그램으로 구현하기 위한 프로그램이 기록된 컴퓨터로 판독 가능한

기록매체를 제공한다.

[0034] 또한 본 발명은, 상술한 방법을 적용한 진단 장치를 제공하며, 상기 진단 장치는 가해지는 기계적 하중 또는 진행되는 크랙의 길이에 따라 변화되는 탄소섬유 복합재의 물성값을 측정하는 물성값 측정 유닛; 상기 탄소섬유 복합재에 가해지는 기계적 하중에 대한 응력 분포 시뮬레이션을 기초로 상기 물성값의 거동을 예측하는 예측 구간을 분할하고, 상기 예측 구간에 따라 설정되는 열화 함수를 달리하여 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위한 물리 모델을 설정하는 물리 모델 설정 유닛; 및 상기 물리 모델에 상기 탄소섬유 복합재의 물성값을 입력하고 파티클 필터를 이용하여 상기 탄소섬유 복합재의 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 잔여유효수명 예측 유닛을 포함할 수 있다.

[0035] 실시 예에 따라, 상기 물성값 측정 유닛은, Dual Cantilever Beam test(DCB 테스트)로 수행되며, 상기 기계적 하중에 따라 크랙이 진행되는 방향으로 적어도 하나 이상 전극의 위치를 선정하여 설치하여 이들 전극 사이의 전기 저항값을 측정할 수 있다.

[0036] 실시 예에 따라, 상기 물리 모델 설정 유닛은, 상기 탄소섬유 복합재의 물성값의 시간에 따른 변화 정도인 기울기값에 따라 적어도 하나 이상의 예측 구간을 설정하여 상기 예측 구간의 저항 변화값을 예측할 수 있는 미정계수(undetermined multiplier)가 포함된 열화 함수로부터 각 계수를 추정해나가는 과정을 통해 물리 모델을 설정할 수 있다.

[0037] 실시 예에 따라, 상기 물리 모델 설정 유닛은, 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) 또는 하이브리드 섬유강화 플라스틱(HFRP: Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)으로 구성된 탄소섬유 복합재의 종류에 따라 상기 예측 구간을 각각 4개 또는 2개로 설정하여 상기 물리 모델을 설정할 수 있다.

발명의 효과

[0039] 전술한 바와 같은 구성을 갖는 본 발명에 따르면, 복잡한 거동을 예측하는 경우 구조물에서 분할 예측을 수행하여 정확도를 높이는 이점이 있다.

도면의 간단한 설명

[0041] 도 1은 종래의 진단 방법에서의 문제점을 나타낸다.

도 2는 본 발명의 실시 예에 따라 복잡한 거동을 부분적으로 분석하는 모습을 나타낸다.

도 3은 본 발명의 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 및 진단 방법의 순서도를 나타낸다.

도 4는 본 발명의 실시 예에 따라 전극을 지정된 위치에 설치하는 모습이다.

도 5는 도 4에서 설치된 각 전극의 각 위치에서 측정된 데이터를 나타낸다.

도 6 내지 도 9는 본 발명의 실시 예에 따라 도 5의 채널 4에서 각 예측 구간에서의 예측 수행 모습이다.

도 10은 본 발명의 실시 예에 따른 채널4에서의 각 예측 구간을 분할한 모습이다.

도 11은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 하이브리드 섬유강화 플라스틱에서 2개의 예측 구간을 나누는 모습을 나타낸다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0042] 본 명세서에서 사용되는 용어에 대해 간략히 설명하고, 본 발명에 대해 구체적으로 설명하기로 한다.

[0043] 본 발명에서 사용되는 용어는 본 발명에서의 기능을 고려하면서 가능한 현재 널리 사용되는 일반적인 용어들을 선택하였으나, 이는 당 분야에 종사하는 기술자의 의도 또는 판례, 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 발명의 설명 부분에서 상세히 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 본 발명에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌, 그 용어가 가지는 의미와 본 발명의 전반에 걸친 내용을 토대로 정의되어야 한다.

[0044] 명세서 전체에서 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른

구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있음을 의미한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어 또는 소프트웨어로 구현되거나 하드웨어와 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다. 또한, 명세서 전체에서 어떤 부분이 다른 부분과 "연결"되어 있다고 할 때, 이는 "직접적으로 연결"되어 있는 경우뿐 아니라, "그 중간에 다른 구성을 사이에 두고" 연결되어 있는 경우도 포함한다.

[0045] 아래에서는 첨부한 도면을 참조하여 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자가 용이하게 실시할 수 있도록 본 발명의 실시 예를 상세히 설명한다. 그러나 본 발명은 여러 가지 상이한 형태로 구현될 수 있으며 여기에서 설명하는 실시 예에 한정되지 않는다. 그리고 도면에서 본 발명을 명확하게 설명하기 위해서 설명과 관계없는 부분은 생략하였으며, 명세서 전체를 통하여 유사한 부분에 대해서는 유사한 도면 부호를 붙였다.

[0046] 본 발명에서 사용하는 용어는, 듀얼 캔틸레버 빔(DCB: Dual Cantilever Beam), 탄소섬유 강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic), 하이브리드 섬유 강화 플라스틱(HFRP: Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)이 있다.

[0047] 상기 탄소섬유 복합재는, 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic) 또는 하이브리드 섬유 강화 플라스틱(HFRP: Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)를 포함할 수 있다. 하지만, 탄소섬유 복합재는 이에 제한되지 않고, 탄소섬유를 포함하여 도전성을 띄는 복합재이면 적용될 수 있다.

[0048] 본 발명의 실시 예에 따라, 탄소섬유강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)은 4개의 예측 구간으로 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)의 예측이 수행되고, 상기 하이브리드 섬유 강화 플라스틱(HFRP: Carbon-glass Hybrid Fiber Reinforced Plastic)은 2개의 예측 구간으로 상기 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime) 예측을 수행할 수 있다.

[0049] 도 1은 종래의 진단 방법에서의 문제점을 나타낸다.

[0050] 도 1은 시간에 따른 복합재 물성값의 거동을 나타내는 그래프로서, x축은 시간을 나타내고, y축은 복합재의 물성값을 나타내고 있다. 푸른색 실선은 실제 물성값의 거동을 도시하고, 붉은 실선은 현재 시점에서 예측되는 물성값의 거동 중간값을 나타내며, 붉은 점선은 예측되는 물성값 거동의 90% PI 범위를 나타내고 있다.

[0051] 여기에서, 붉은 실선을 따르는 거동 예측은 종래의 거동 구간을 분할하지 않는 방법론에 의해 산출되는 거동이다.

[0052] 도 1의 (a) 및 (b)는 복합재의 물성값의 거동이 복잡하게 이루어지는 경우, 특정한 시점에서 향후의 물성값의 변화 거동을 예측하고자 할 때 종래의 방법론에 따르면 잘못된 거동 예측을 피할 수 없게 됨을 나타낸다.

[0053] 도 1을 참조하면, 복잡한 거동예측 시 앞선 경우와 같이 잘못된 예측을 하는 경우가 존재하게 되고 나아가, 복잡한 거동 예측을 위한 복잡한 물리식은 계산 시간의 증가를 초래하며 빠른 예측 및 정확한 예측이 어려움이 생길 수 있다. 또한, 복합재 뿐만 아니라 복잡하면서도 다양한 파손 메커니즘이 있는 구조물에서 분할 예측이 정확도를 높여 줄 수 있는 수단이 필요하다.

[0054] 도 2는 본 발명의 실시 예에 따라 복잡한 거동을 섹션을 분할하여 분석하는 모습을 나타낸다.

[0055] 도 2를 참조하면, 도 1과 같이 섹션을 분할하지 않은 경우 발생할 수 있는 문제점을 보완하게 되는데, 변화되는 각 구간의 특징을 추출하여 각 부분에서의 물성 거동을 예측할 수 있다. 도 2의 x축, y축, 푸른색 실선, 붉은색 실선 및 점선은 도 1과 동일한 방식으로 적용되었으며, 도 2는 도 1에 비하여 거동의 구간이 분할되어 구성되어 있다.

[0056] 한편, 복합재에 발생하는 크랙과 같은 열화 요인들을 모니터링하기 위하여, 측정되는 물성값으로 복합재의 전기저항이나 응력(stress), 변형(strain)과 같이 하중 조건의 변화값을 측정하여 거동을 예측할 수 있다.

[0057] 전기저항의 변화나 크랙이 진전됨에 따른 하중 조건의 변화와 같이 물성값이 급격히 달라지는 지점은, 상기 탄소섬유 복합체의 섬유 적층 조건, 섬유 층진율 또는 섬유의 종류에 따라 변화될 수 있다. 섹션의 분할 기점에 대한 판단은 복합재 압저항 효과의 기본 원리를 통해 확인할 수 있다.

[0058] 탄소섬유 복합체의 파손 부위에 장력이 작용하면, 파손 부위에 설치된 전극에서의 전기저항 변화량은 양이 되고, 압축력이 작용하면 전기저항 변화량이 음이 되는데, 이러한 전기저항값의 변화 정도에 따라 섹션별로 구간을 나누어 적용할 수 있다. 또한, 시뮬레이션을 통하여 복잡한 구조물에 작용하는 하중에 따른 응력 분포를 분석하여 섹션별로 구간을 나누어 해석할 수도 있다. 응력 변화율이 양에서 음 또는 음에서 양으로 기울기가 바

꺼거나, 수치가 크게 변화하는 경우에 섹션을 나눌 수 있다.

[0059] 이러한 원리를 통해 구간을 분할하여 분석을 수행할 수 있으며, 첫번째 구간은, DCB(Dual Cantilever Beam test) 테스트 중 crack tip에서 멀 때 장력이 작게 작용하는 구간으로, 두번째 구간은, crack tip에 다가오면서 벤딩에 대한 장력으로 전기저항이 급속히 증가하는 구간, 세번째 구간은 crack tip이 전극에 근접하여 압축력이 걸려 음의 전기저항이 발생하는 구간 및 네번째 구간은 crack tip이 전극을 통과한 후 전하가 크랙을 우회하여 이동함으로써 전기저항 변화량이 증가하는 구간으로 나눌 수 있다.

[0060] 이는 복합재라는 구조물에 제한 되어 있지 않고 복잡한 물성 저하 메커니즘을 가진 구조물이라면 적용이 가능하다.

[0061] 도 3은 본 발명의 파티클 필터를 이용한 탄소섬유 복합재의 건전성 예지 및 진단 방법의 순서도를 나타낸다.

[0062] 도 3을 참조하면, 본 발명은 전극을 지정된 위치에 설치하여 탄소섬유 복합재의 전기저항값을 측정하는 단계로서 탄소섬유 복합재의 거동을 해석할 수 있는 물성값을 측정하는 단계(시뮬레이션을 통한 전기저항 분포 및 하중 조건 분석)(S10), 거동예측을 수행하기 위한 물리모델 설정단계(S20); 잔여유효수명(RUL)을 예측하는 단계(S30)를 포함할 수 있다.

[0063] 도 4는 본 발명의 실시 예에 따라 전극을 지정된 위치에 설치하는 모습이다.

[0064] 전극을 지정된 위치에 설치하는 단계(S10)는, 파손 또는 가해지는 기계적 응력에 따라 탄소섬유 복합재의 변화되는 전기 저항값을 측정하기 위한 과정이다. 상기 전극을 지정된 위치에 설치하는 단계는, 상기 탄소섬유 복합재의 기계적 응력 분포 시뮬레이션에 기초하여 DCB 테스트를 수행하기 위해 상기 기계적 응력에 따라 크랙의 진행방향으로 적어도 하나 이상 전극의 위치를 선정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0065] 본 발명의 실시 예에 따라 탄소섬유 강화플라스틱(CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastic)에 전극을 설치한 모습을 나타낸다. 복합재에 함유된 탄소로 인하여 시편은 도전성을 띠며, 전극은 시편의 상부 및 하부에 소정 깊이 소정 거리를 두고 8개가 배치될 수 있다.

[0066] 한 쌍의 전극으로 구성되어 전기저항의 변화가 측정되는 채널은 1~7 채널로 구성되며, 1~4 채널은 상부 전극과 하부 전극의 쌍으로, 5~7 채널은 상부 전극의 쌍으로만 구성된다.

[0067] DCB 테스트는 DCB를 상하측으로부터 인장 하중을 가하여 크랙이 전파되는 길이를 이미지로 촬영하고 크랙 길이를 사진 픽셀로 계산하고, DCB 테스트는 채널별로 크랙 길이에 따른 전기저항 변화량을 측정하여 이를 기초로 파티클 필터 방법을 통해 잔여 유효 수명을 예측할 수 있다.

[0068] 물리 모델을 설정하는 단계(S20)는, 각 구간의 거동 예측을 수행하기 위하여 상기 전극에서 측정된 전기 저항값의 변화 또는 기계적 응력 분포 시뮬레이션에 기초하여 상기 탄소섬유 복합재의 예측 구간을 분할하고 상기 예측 구간에 따라 설정되는 수식을 달리하여 물리 모델을 설정할 수 있다.

[0069] 물리 모델을 설정하는 단계는, 상기 물리 수식의 계수를 추정하기 위해 상기 탄소섬유 복합재의 저항 변화값으로 상기 물리 수식을 수학식1과 같이 열화 함수를 가정하는 단계를 포함할 수 있다. 이후, 잔여유효수명을 예측하는 단계에서 파티클 필터 과정을 반복하여 상기 열화 함수의 계수를 추정할 수 있게 된다.

[0070] [수학식1]

[0071] Piezoresistivity property: $\frac{dR}{R} = \alpha(x)^n$

[0072] (여기서, x : 시간 또는 크랙 길이, R: 전기 저항, a,n: 열화함수 파라미터(계수)를 의미함.)

[0073] 물리 수식은, 수학식2와 같은 선형 함수 또는 수학식 3과 같은 지수 함수를 포함할 수 있다.

[0074] [수학식2]

[0075] $dr = \alpha \times \epsilon^b \times dx$

[0076] [수학식3]

[0077] $dr = \alpha \times \epsilon^{bx} \times dx$

[0078] (여기서, x : 인장 시험시간, ϵ : 변형률(strain), a, b : 열화함수 파라미터)

[0079] 탄소 복합재의 경우, 전기전도성을 가지고 있어 별도의 센서 없이 전극을 설치하는 것만으로 파손이 진행됨에 따른 전기저항의 변화(압저항; piezoresistivity)를 데이터로 획득할 수 있으며, 이 데이터 세트는 비교적 용량이 작은 DB에 해당된다. 따라서, 별도의 센서없이 실시간으로 측정된 측정값을 이용하여 잔여유효수명을 예측할 수 있게 된다.

[0080] 나아가, 상기한 전기저항의 변화는 비교적 단순한 물리 모델에 기반하는데, 파손 부위에 장력(Tension)이 작용하면, 전기저항 변화량이 양이 되고, 압축력(Compression)이 작용하면 전기저항 변화량이 음이 된다.

[0081] 전기 저항 변화량에 기초한 물리 모델 식을 수립하고 이 모델을 이용하여 예지를 수행하며, 탄소 복합재의 파손과 관련된 열화 함수를 도출하기 위해 파리스 법칙(Paris Law)를 따르는 열화 함수를 위와 같이 차용할 수 있다.

[0082] Degradation function / Paris Law
$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m$$

[0083] (여기서, a : 크랙 길이, N : 전체 하중 회수, ΔK : 응력집중인자(stress intensity factor) 범위, C, m : 파리스 법칙 파라미터)

[0084] 탄소 복합재의 전기저항 변화에 따른 파손과 관련된 열화 함수를 구하기 위해 아래와 같이 가정할 수 있다.

[0085] Piezoresistivity property :
$$\frac{dR}{R} = \alpha(x)^n$$

[0086] (여기서, x : 시간 or 크랙 길이, R : 전기 저항, α, n : 열화함수 파라미터)

[0087] 잔여유효수명(RUL: Remaining Useful Lifetime)을 예측하는 단계는, 전기저항 변화를 예측함으로써 잔여유효수명을 계산할 수 있는데, 상기 물리 모델에 탄소섬유 복합재의 입력 데이터를 입력하여 산출할 수 있다.

[0088] 도 5는 도 4에서 설치된 각 전극의 각 위치에서 측정된 데이터를 나타낸다.

[0089] 보다 구체적으로, 도 5의 x축은 DCB 테스트에서의 복합재의 인장 길이(tensile extension)를 도시하고, y축은 전기저항 변화량(electrical resistance change ratio)과 크랙 길이를 나타낸다.

[0090] 도 5를 참조하면, 채널별로 크랙 길이에 따른 전기저항 변화량을 측정하여 그래프로 나타낸 모습으로 채널 중 크랙이 이미 지나간 채널 1을 제외하고는 물성의 거동이 유사한 양상을 보인다.

[0091] DCB 테스트 중 복합재의 크랙 길이를 표시하는 data1의 경우 점진적으로 증가하는 단순한 양상을 보이고 있지만, 채널의 전기저항 변화량은 복잡한 거동양상을 나타내고 있다는 점에서 보다 정확한 거동 예측을 위해 구간을 나눈 예측이 필요하다고 하겠다.

[0092] 도 6 내지 도 9는 본 발명의 실시 예에 따라 도 5의 채널 4에서 각 예측 구간에서의 예측 수행 모습이다. 도 6 내지 도 9에서 좌측의 (a) 그래프는 도 5의 채널 4만을 도시한 것이며, 우측의 (b) 그래프는 해당 섹션까지의 데이터에 기초하여 저항 변화값의 거동을 예측한 것으로, 붉은색 굵은 점선은 예측되는 물성값인 저항 변화값의 거동 중간값을 나타내며, 붉은색 가는 점선은 예측되는 저항 변화값 거동의 90% PI 범위를 나타내고 있다. 여기에서, 노란색 실선은 DCB 테스트에서 복합재의 파단 역치값(Threshold value setting at beam failure)을 도시하고 있다.

[0093] 상기 물리 모델을 설정하는 단계는, 상기 탄소섬유 복합재의 기계적 응력 분포 시뮬레이션을 통한 저항 변화값이 급격히 달라지는 지점에 따라 적어도 하나 이상의 예측 구간을 설정하는 단계; 및 상기 예측 구간의 저항 변화값의 분포 형태 또는 분포 측정 값을 분석하여 상기 예측 구간의 저항 변화값을 예측할 수 있는 미정 계수(undetermined multiplier)가 포함된 물리 수식을 설정하는 단계를 포함할 수 있다.

[0094] 도 6 내지 도 9는, DCB 테스트 동안에 각 채널의 구간을 설정하고, 채널 4에 대해 구간별 측정 데이터로 파티클 필터 과정을 거쳐 고장 예지하는 모습으로, 열화 함수를 리니어 함수($y=b*t$)로 하여 계수를 정하고, 이에 기초하여 고장을 예지할 수 있다. 즉, 단순한 경향을 보이는 경우, 비교적 정확하게 파손을 예측할 수 있다. 다만, 도 6 내지 도 8의 섹션 1 내지 섹션 3의 경우는 각 값의 예측값이 실제 거동과는 다르게 예측되어 정확히

예측이 되지 않는데, 복잡한 거동에 대해 충분히 섹션을 분할하지 않고 파티클 필터를 이용한 예측 과정을 수행하여 정확한 예측이 되지 않았음을 확인할 수 있다. 섹션 4의 경우 실제 거동과 유사하게 나타나 거동이 예측될 수 있다. 즉, DCB테스트를 수행하는데 있어 CFRP의 경우 섹션을 4개로 분할하여 측정해야 정확한 예측값을 얻을 수 있음을 의미한다.

[0095] 도 10은 본 발명의 실시 예에 따른 채널4에서의 각 예측 구간을 분할한 모습이다.

[0096] 도 10을 참조하면, 채널 4에서 크랙 길이에 따른 전기저항 변화량을 나타내는데, 위 도 6 내지 도 9에서 진행한 내용을 종합한 결과이다.

[0097] 즉, CFRP의 경우 시뮬레이션 결과를 바탕으로 구간 분할 및 물성 거동 분석 및 고장예지에 반영 시, CFRP는 4개의 섹션으로 구분됨이 바람직하다. 섹션1→섹션2 기울기의 값이 급작스럽게 증가하고, 섹션2→섹션3 기울기가 양에서 음의 값으로 변화되며, 섹션 3→섹션4 기울기가 음에서 양의 값으로 변화되기에 구간을 시뮬레이션을 정확하게 얻을 수 있다.

[0098] 도 11은 본 발명의 다른 실시 예에 따른 하이브리드 섬유강화 플라스틱에서 2개의 예측 구간을 나누는 모습을 나타낸다. 도 11은 도 5 내지 도 10과 동일한 방식으로 도시되어 있다.

[0099] 도 11을 참조하면, 하이브리드 섬유강화 플라스틱으로, Hybrid fiber 로 제작된 복합재의 경우 비교적 단순한 패턴의 전기저항변화가 나타나고, 따라서 2구간 으로도 정확한 예측이 가능함을 나타낸다.

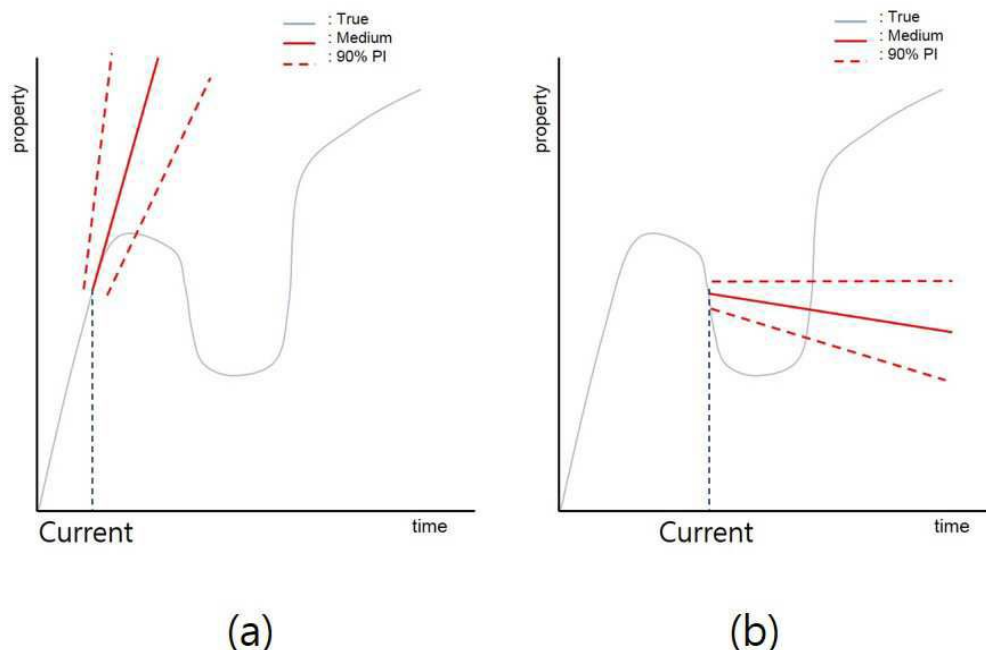
[0100] 본 발명의 경우, 종래의 예측이 정확하지 않은 거동을 해결하기 위해 비교적 단순한 물리식을 바탕으로 복잡한 물성 거동을 섹션으로 나누어 조금 더 정확하고 빠른 예측을 할 수 있으며, 복합재라는 구조물에 제한 되어 있지 않고 복잡한 물성 저하 메커니즘을 가진 구조물이라면 적용이 가능하다.

[0101] 본 발명이 적용되는 경우, 예측을 적용하고자 하는 각 분야의 물성 거동에 대한 이해가 수반되어야 하며, 섹션으로 나누어진 구간별 물리모델을 세우고, 이에 기초하여 예지를 수행할 수 있다.

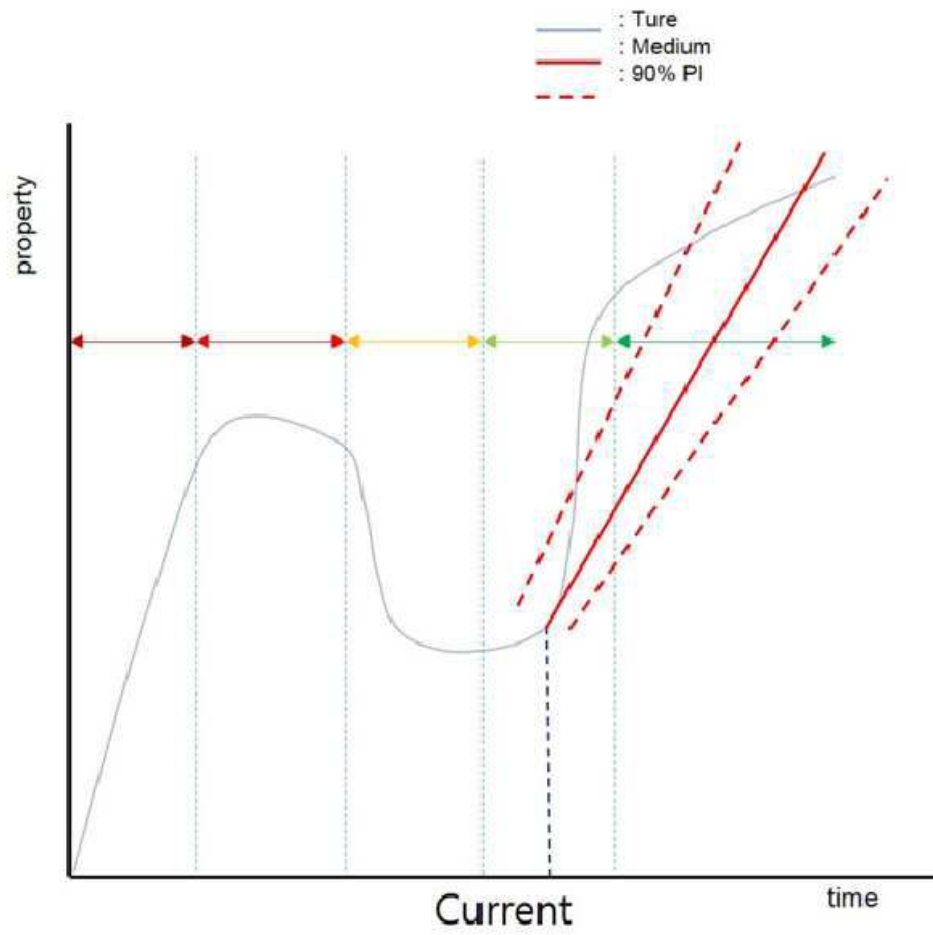
[0102] 이상에서 대표적인 실시예를 통하여 본 발명을 상세하게 설명하였으나, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 상술한 실시예에 대하여 본 발명의 범주에서 벗어나지 않는 한도 내에서 다양한 변형이 가능함을 이해할 것이다. 그러므로 본 발명의 권리 범위는 설명한 실시예에 국한되어 정해져서는 안 되며, 후술하는 특허청구범위뿐만 아니라 특허청구범위와 균등 개념으로부터 도출되는 모든 변경 또는 변형된 형태에 의하여 정해져야 한다.

도면

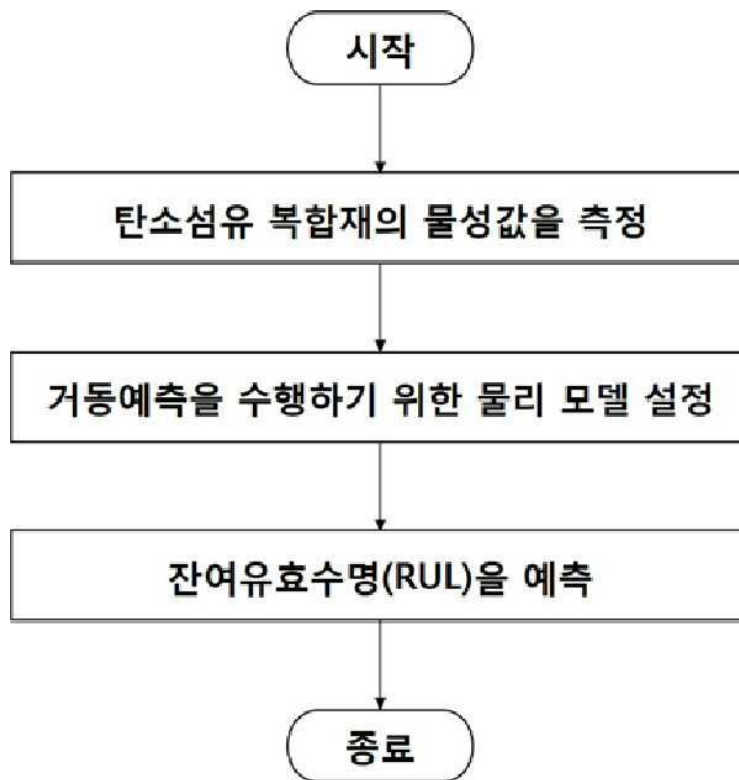
도면1



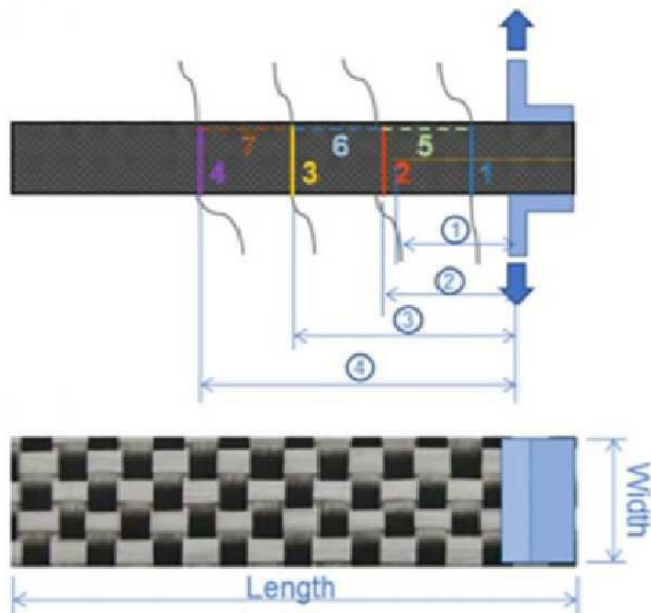
도면2



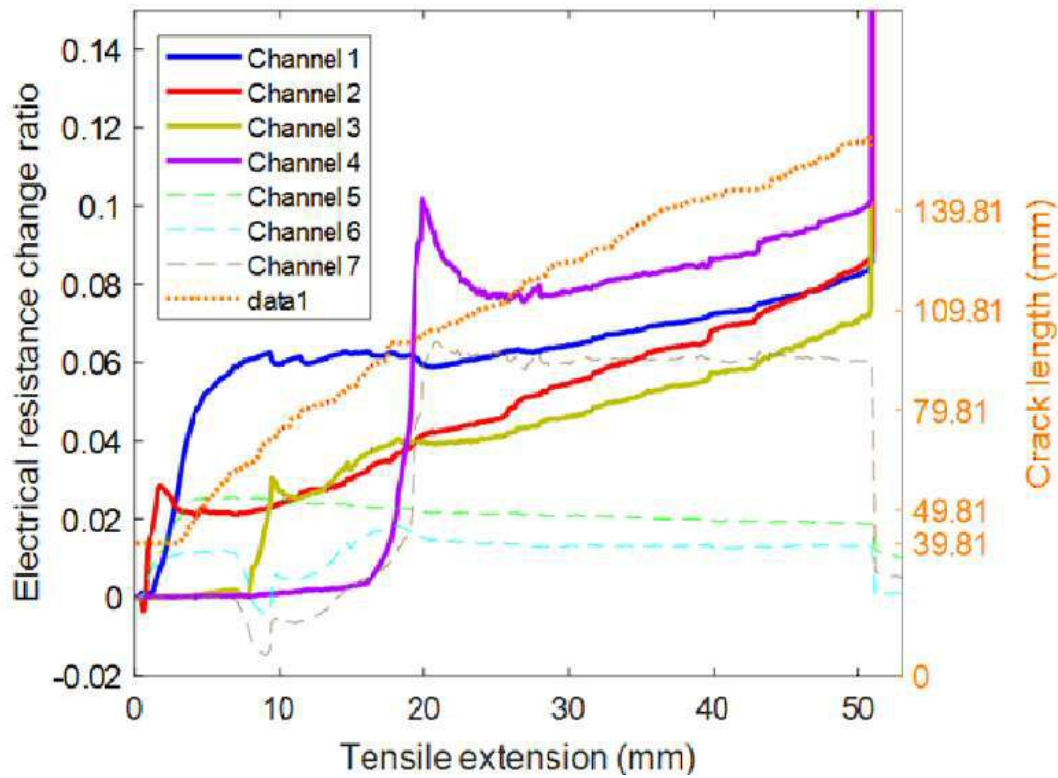
도면3



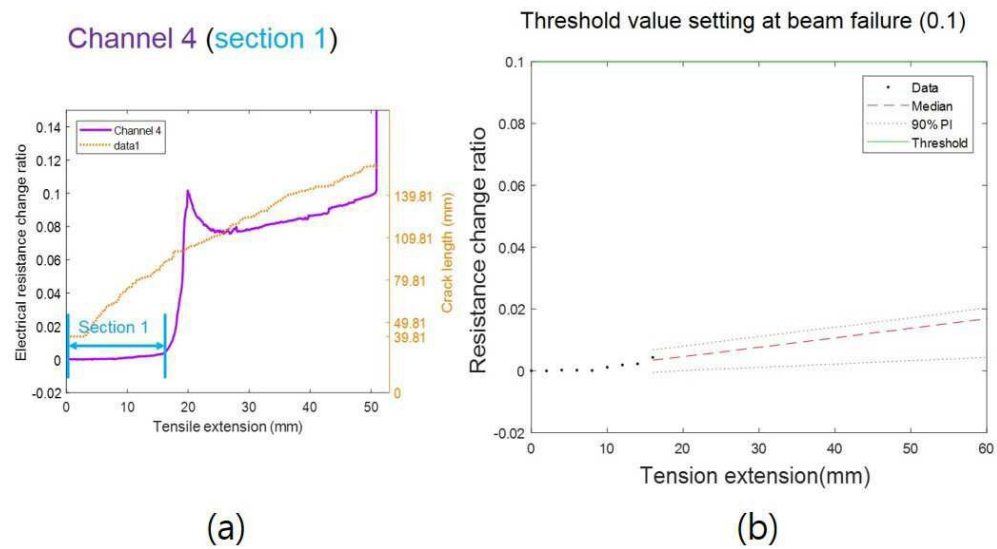
도면4



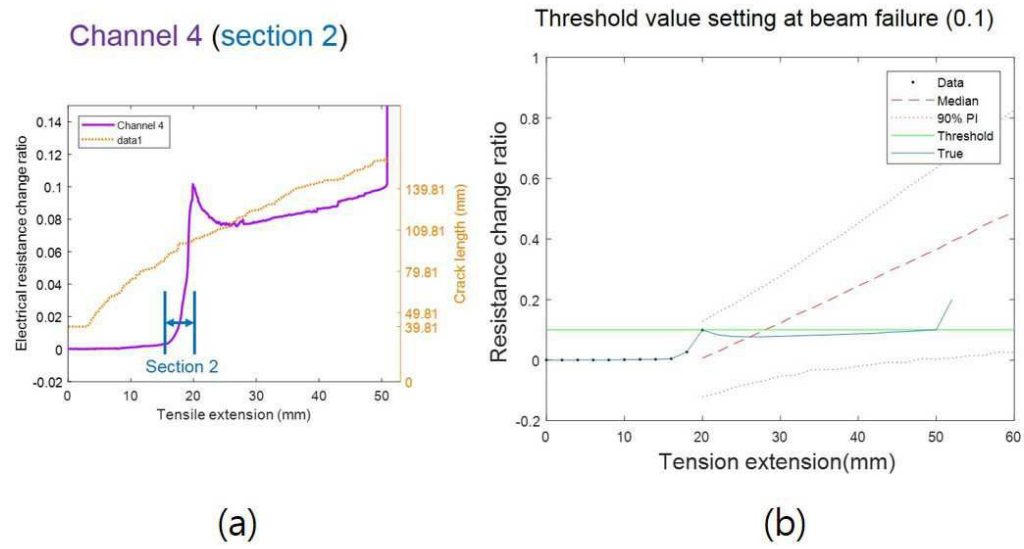
도면5



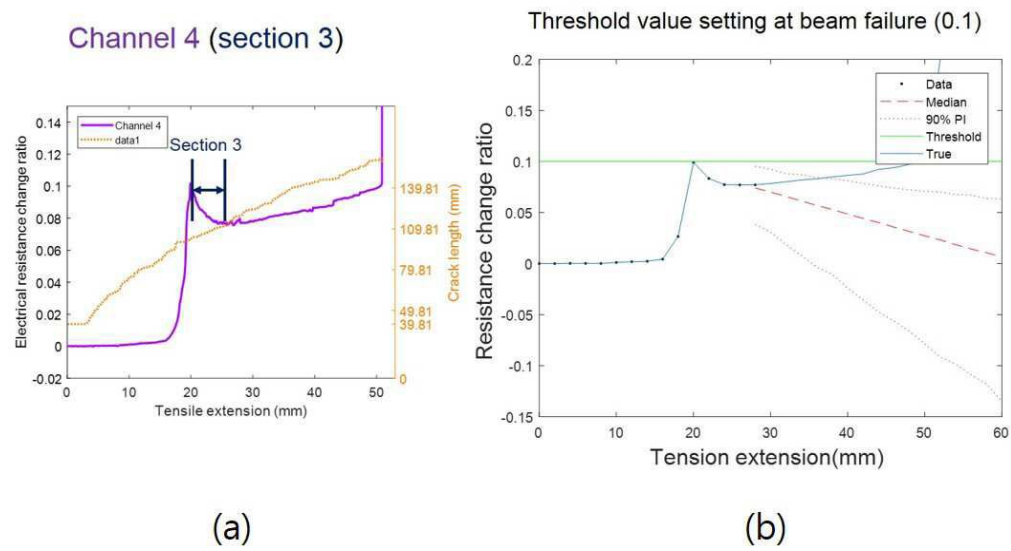
도면6



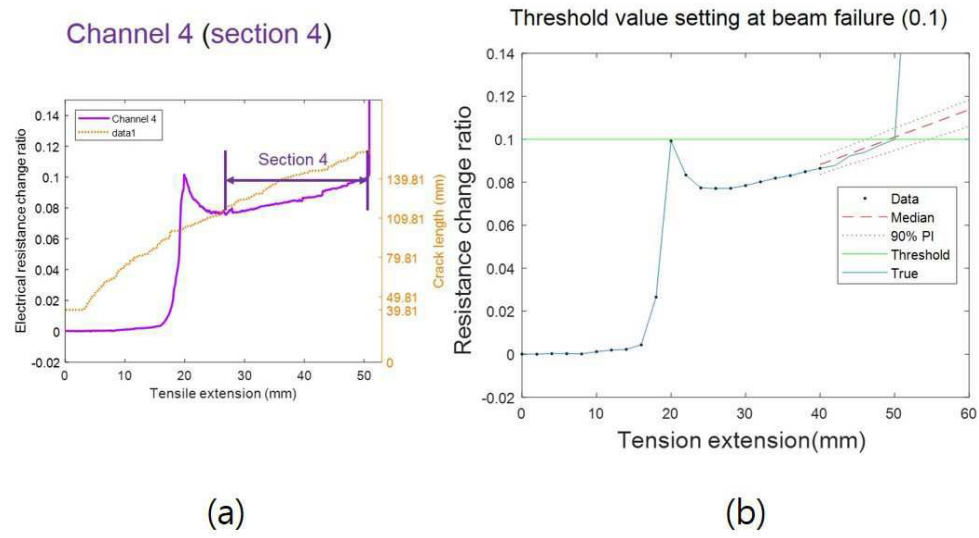
도면7



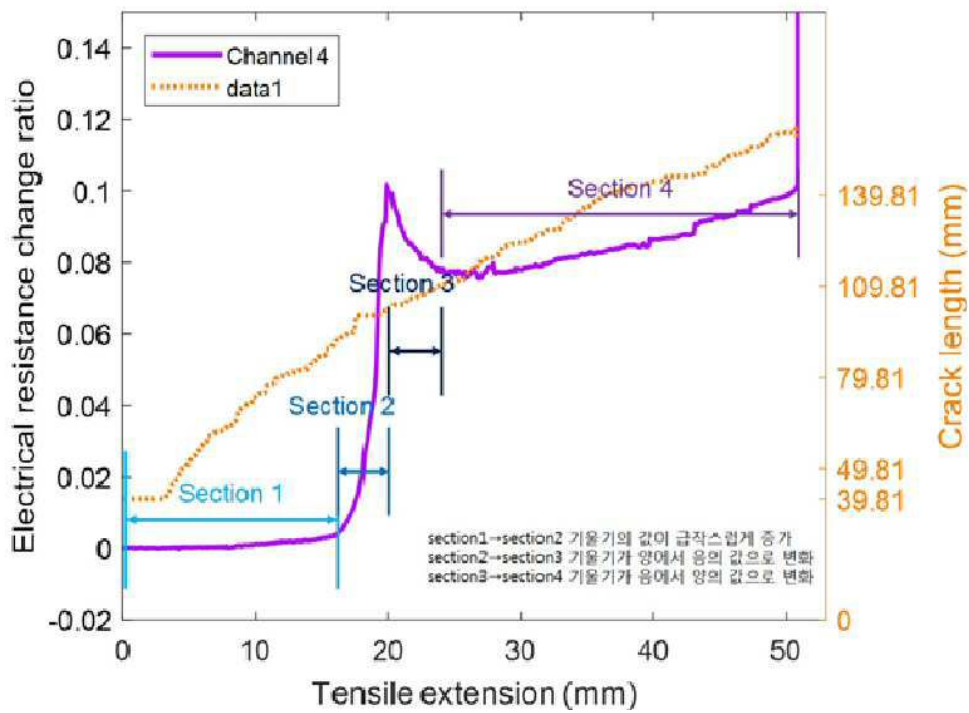
도면8



도면9



도면10



도면11

