

딥러닝을 이용하여 진동 응답 기반 비선형 변환 접근법을 적용한 단일 랩 조인트의 접착 면적 탐지 시스템

김민제¹·김동윤²·윤길호^{3†}

¹한양대학교 기계공학부 석사과정, ²한양대학교 기계공학부 박사과정, ³한양대학교 기계공학부 교수

Adhesive Area Detection System of Single-Lap Joint Using Vibration-Response-Based Nonlinear Transformation Approach for Deep Learning

Min-Je Kim¹, Dong-Yoon Kim² and Gil Ho Yoon^{3†}

¹Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

²Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

³Professor, Department of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

Abstract

A vibration response-based detection system was used to investigate the adhesive areas of single-lap joints using a nonlinear transformation approach for deep learning. In industry or engineering fields, it is difficult to know the condition of an invisible part within a structure that cannot easily be disassembled and the conditions of adhesive areas of adhesively bonded structures. To address these issues, a detection method was devised that uses nonlinear transformation to determine the adhesive areas of various single-lap-jointed specimens from the vibration response of the reference specimen. In this study, a frequency response function with nonlinear transformation was employed to identify the vibration characteristics, and a virtual spectrogram was used for classification in convolutional neural network based deep learning. Moreover, a vibration experiment, an analytical solution, and a finite-element analysis were performed to verify the developed method with aluminum, carbon fiber composite, and ultra-high-molecular-weight polyethylene specimens.

Keywords : nonlinear transformation, frequency response function, adhesive area, convolutional neural network

1. 서론

본 연구에서는 비선형 변환 기반의 합성곱신경망(CNN: Convolutional Neural Networks)을 이용한 Single-lap joint 시편의 접착 면적 탐지 방법을 제안한다. 접착제를 이용한 결합 방식은 화학적 체결 방법으로서 기계적 결합에 비해 하중 분포에 용이하여 응력집중을 피하고 가공하기 어려운 구조물이나 용접성의 제한이 있는 재료에 효과적이다. 특히 항공 산업에서의 접착 면적에 따른 강성변화는 안전으로 직결되기에 매우 중요한 문제이다. 이러한 문제를 다루기 위해서 접착 시편에 대한 진동 분석 기반의 연구가 수행됐다(Du and Shi, 2014). 이

외에도 접착이 사용되는 여러 구조물에서 보이지 않는 부분의 접착 상태를 확인함에 제한이 있고, 이를 해결하고자 본 연구를 수행했다.

일반적으로 구조물의 진동 특성은 재료, 구조, 경계조건 등 다양한 요인에 의해 달라진다. 이러한 요인들에 의한 진동 특성의 변화와 접착조건을 고려하기 위해 이 연구는 Aluminum, Carbon-fiber, Ultra-high-molecular-weight polyethylene(UHMWPE) 시편을 사용했고 Single-lap joint 접착조건에서 접착 면적 변화에 따른 진동 특성을 확인하기 위해 주파수 응답을 확인했다. 또한, 서로 다른 시편의 주파수 응답을 이용하여 각 시편에 대한 접착 면적 변화를 탐지하기 위해 비선형 변환 방법(Kim

†Corresponding author:

Tel: +82-2-2220-0451; E-mail: ghy@hanyang.ac.kr

Received January 4 2023; Revised February 5 2023;

Accepted February 6 2023

© 2023 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

et al., 2022)을 적용했다.

최근 몇 년 동안 컴퓨터 기술의 발전과 함께 이상진단과 같은 복잡한 문제를 해결하고자 다양한 딥러닝 기법이 발전됐다 (LeCun et al., 2015). 이러한 딥러닝 기법 중에서 고장 진단을 수행하기 위해 이미지 기반 분류기인 CNN을 주로 사용한다. 본 연구에서는 진동 기반 스펙트로그램을 사용하여 접착 면적의 변화에 따른 주파수 응답차이를 이미지화시키고 CNN을 사용하여 진단했다. 이 연구에서 제시하는 비선형 변환 기반 접착 면적 탐지 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다.

2. 연구 방법

2.1 실험 및 시뮬레이션 방법

본 연구에서는 접착 조건에 따른 진동 특성을 확인하기 위해 Fig. 2와 같이 단일 시편과 Single-lap joint 접착 방식을 이용

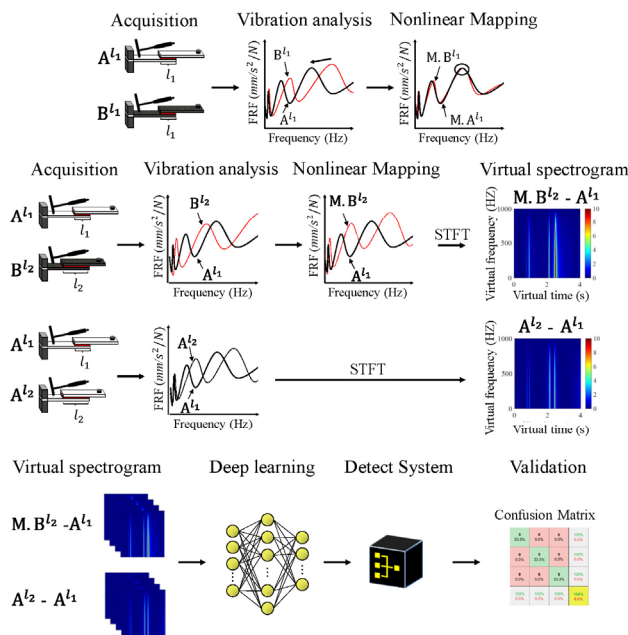


Fig. 1 Procedure of the adhesive area detection system

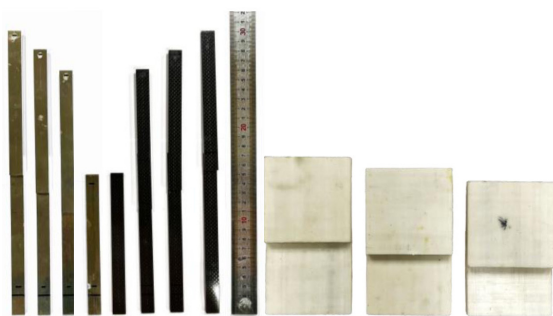


Fig. 2 Experimental specimens with single specimens and single lap jointed specimens

한 시편을 제작했다. 외팔보 형상의 시편과 접착방식을 사용한 이유는 진동실험을 수행하기에 수월하고 분석적 해와 유한 요소 해석의 비교가 용이하기 때문이다. 길이가 다른 2개의 시편을 사용해 Single-lap joint 조건으로 접착했고 더 긴 부분을 지그에 고정시켜 실험했다. 이는 지그에 고정되는 길이를 제외한 두 시편의 길이가 동일하게 하기 위함이다.

접착에 사용된 접합제는 Loctite 401을 사용했으며 시편의 재료는 알루미늄(Al: Aluminum 6101)과 탄소섬유복합재(CFC: Carbon-fiber)와 초고분자량 폴리에틸렌(UHMWPE)를 사용했다. 첫 번째 예제는 등방성(Isotropic) 재료인 알루미늄을 사용했고 두 번째 예제에서는 이방성(Anisotropic) 재료인 CFC 사용했다. 세 번째 예제는 접착제와 화학적 결합이 어렵고 접착 성능을 높이기 위해 연구된 UHMWPE를 사용했다(Oosterom et al., 2006).

2.2 진동 실험 방법

Fig. 3은 강제 가진에 의한 구조물의 고유 진동수 변화를 확인하기 위한 충격 가진실험(Impact hammer test)이다. 가진 실험을 위해 시편을 20mm만큼 강철 지그(Jig)에 고정하여 외팔보 진동실험을 수행했다. 고정된 지그로부터 10mm 거리에서 임팩트 해머(PCB 086C03)를 이용하여 면의 수직방향으로 힘을 가했고, 고정된 지그의 반대 방향에서 5mm 거리에 가속도계(KISTLER 8778A500)를 부착했다. 임팩트 해머와 가속도계는 가진 방향 고유 진동수를 측정하기 위해 좌우 대칭점에 정확히 부착하는데 유의했다. 임팩트 해머와 가속도계에서의 신호를 DAQ(NI 9234)장비를 통해 시간 대비 가속도 데이터를 얻었으며, MATLAB을 이용하여 주파수 응답함수로 변환하여 각 시편에서의 고유 진동수를 확인했고 5번의 반복실험에 평균값을 적용하여 실험의 정확성을 높였다.

2.3 외팔보의 분석적 해

접착되지 않은 외팔보 형상의 단일 시편의 강제 응답 실험 결과를 비교하기 위해 우선적으로 분석적 해(Analytical Solution)를 이용하여 재료의 진동특성을 확인했다. 이 연구에서 분석

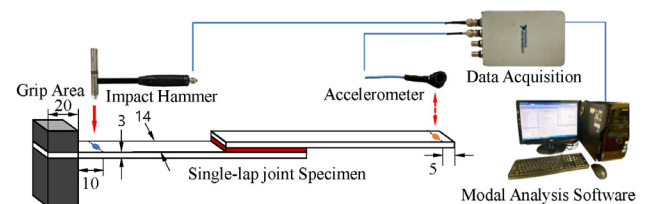


Fig. 3 Illustration of vibration experimental setup

적 해는 Fig. 4와 같이 Euler-Bernoulli의 외팔보 고유 진동수 이론(Bauchau and Craig, 2009)을 사용했다. 분석적 해는 등방성 재료인 외팔보 형상의 고유 진동수를 계산하기 위함이다. 실험에 사용된 CFC와 UHMWPE의 재료 특성상 방향성을 갖고 있기에 분석적 해를 적용하기에는 제한이 있다. 이 연구에서는 Aluminum만 진동 특성을 검증하는데 있어 분석적 해를 적용했는데, 이는 Aluminum으로 만든 Single-lap joint 시편이 비선형 변형이 적용될 기준 시편으로 진동특성의 정확한 검증이 필요하기 때문이다. 다음 절차는 실험과 분석적 해 그리고 유한요소 해석 결과를 사용하여 시편의 물성평가 과정을 설명한다.

- 1) 접착에 사용할 외팔보 단일 시편에 가진 진동실험을 실시하여 1, 2, 3차 모드의 고유 진동수를 확인한다.
- 2) 외팔보의 제원 특성이 적용된 분석적 해에서 Young's Modulus를 변화시키면서 진동실험에 얻은 고유 진동수 값이 일치할 수 있도록 Young's Modulus를 결정한다.
- 3) 결정된 물성을 적용하여 유한요소해석을 수행하고 실험 결과, 분석적 해 그리고 유한요소해석의 결과를 비교하여 실험과 이론의 결과가 모두 일치함을 검증한다.
- 4) 두 시편 사이의 수직접촉강성을 파악하기 위해 Single-lap joint 구조로 접착된 시편의 진동 실험을 수행하고, 구조물의 1차, 2차, 3차 모드의 고유 진동수를 확인한다.
- 5) Single-lap joint 유한요소 해석결과와 두 시편 사이 수직 접촉강성 값을 변화시키면서 실험 결과와 일치할 수 있도록 두 재료 사이의 수직접촉강성을 결정한다.

위를 바탕으로 비선형 변환 및 스펙트로그램의 기준시편으

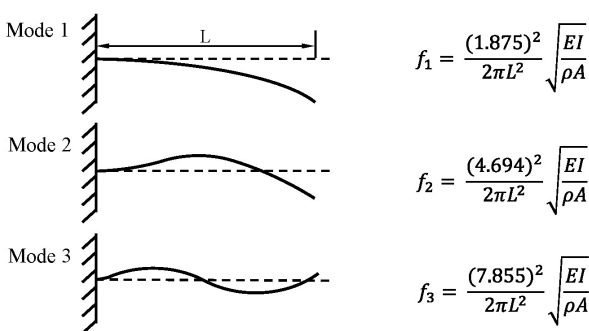


Fig. 4 Mode shapes and natural frequencies for flexural vibration of a cantilever beam

Table 1 Properties of aluminum 6101

Properties	Aluminum(Al 6101)
Density(kg/m^3)	2752
Young's Modulus E_1 (GPa)	62
Poisson's ratio	0.3

로 사용될 AI의 물성치는 Table 1에 나타냈다.

2.4 유한요소해석

접착 면적에 따른 Modal 해석을 수행하기 위해 유한요소해석 상용 소프트웨어 ANSYS Workbench 2021를 이용하여 해석을 Fig. 5와 같이 수행했다. 각 조건에 따른 Modal 해석을 수행하여 구조물이 갖고 있는 고유 진동수와 모드 형상을 확인했다. 가진 실험으로 얻어지는 고유 진동수는 가진 방향에서 나타나는 구조물의 공진이 발생하는 진동수이다. 따라서 유한요소 해석 결과로 얻어지는 고유 진동수 중 가진 방향과 일치하는 고유 진동모드를 실험 결과와 비교했다.

접착제의 접착력을 가정하기 위해 Ansys 내의 Bonded Contact 조건의 Normal Stiffness를 설정했다. Bonded는 Separation과 Sliding이 발생하지 않으므로 접착제의 접촉면적이 변하지 않는다는 것을 가정한다. 물성평가절차를 통해 진동 실험에서 얻은 고유 진동수가 유한요소해석 결과와 일치할 수 있도록 접합제의 Normal Stiffness 값을 $10^{11} N/m^3$ 로 설정했다. 또한, 복합재료는 일반적인 등방성 재료와 다르게 해석에서 고려해야 할 중요한 항목들이 있다. 그중에서 복합재료가 가지고 있는 이방성을 가정하기 위해 ANSYS의 ACP(ANSYS Composite PrePost) 모듈을 기반으로 Fig. 6과 같이 CFC와 UHMWPE의 적층 구조를 모델링했고 Modal 해석은 Solid 유닛으로 수행했다. CFC의 탄소섬유직물은 T300이며, 플라스틱 수지인 에폭시(Epoxy) 소재가 함침되어 제조된 prepreg로 구성되어 있다.

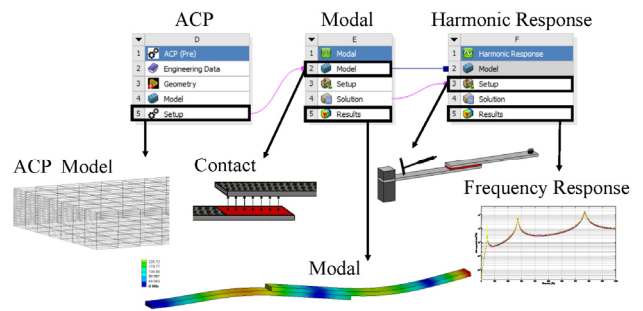


Fig. 5 Simulation setup using ANSYS mechanical Composite PrePost(ACP) to get harmonic response

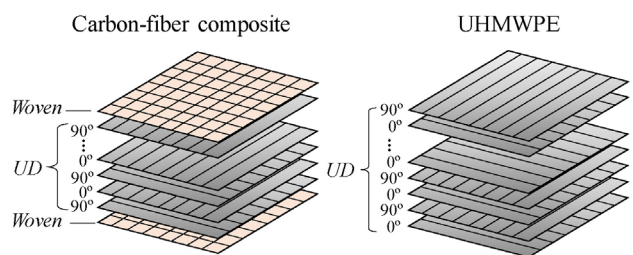


Fig. 6 Stacked layers of CFC and UHMWPE

위아래 표면은 원사가 직교 배열된 Woven층으로 구성되어 있고, Woven층 사이는 원사가 한 방향으로 나열된 UD층으로 90°/0° 순서로 총 18layer 구조로 적층됐다. UHMWPE의 물성치는 논문(Nguyen *et al.*, 2016)을 참고했고 각 50um 두께의 UD층이 90°/0° 순서로 적층 됐다. 본 연구에 사용된 CFC와 UHMWPE의 구성과 상세 물성치는 Table 2과 같다.

2.5 접착 면적 탐지 방법

2.5.1 기준 시편과 탐지 대상 시편

이 장은 비선형 변환 방법을 수행하기 전에 기준 시편과 탐지 대상 시편을 정하고 대략적인 탐지 방법에 대해서 설명한다. 본 논문에서 제시하는 비선형 변환 방법을 수행하기 위해서는 몇 가지 전제조건이 필요하다. 그중에서 어떤 시편이 기준이 되는 것인지가 중요하다. 이 연구에서 사용된 시편인 AI, CFC 그리고 UHMWPE 중에서 AI를 비선형 변환의 기준이 될 시편의 재료로 사용했다. AI 시편을 기준으로 사용한 이유는 저렴한 가격으로 구매하여 얻기 쉽고 등방성 재료로 실험, 분석적 해, 시뮬레이션을 이용하여 기계적 물성치를 알기 수월하기 때문이다. 이 AI 시편을 기준으로 하여 CFC 시편과 UHMWPE 시편의 접착 면적을 탐지하고자 한다. 비선형 변환 함수를 적용하기 위해서는 다음 제시된 4가지 사항을 가정한다.

- 1) 접착 면적 20mm, 40mm, 60mm인 AI 시편의 진동 응답을 기준으로 정한다.

Table 2 Properties of Carbon(Woven, UD) & UHMWPE

Properties	Carbon Woven	Carbon UD	UHMWPE
Density(kg/m^3)	1420	1490	980
X direction Young's Modulus E_1 (GPa)	61.34	121	51.1
Y direction Young's Modulus E_2 (GPa)	61.34	8.6	3.62
Z direction Young's Modulus E_3 (GPa)	6.9	8.6	51.1
X direction Shear Modulus G_1 (GPa)	3.3	4.7	0.192
Y direction Shear Modulus G_2 (GPa)	2.7	3.1	2
Z direction Shear Modulus G_3 (GPa)	2.7	4.7	2
Poisson's Ratio XY	0.04	0.27	0.013
Poisson's Ratio YZ	0.3	0.4	0.013
Poisson's Ratio XZ	0.3	0.27	0.01
Thickness	0.272mm	0.136mm	50um

- 2) 접착 면적 20mm인 CFC와 UHMWPE 시편의 진동 응답을 알고 있다고 가정한다.
- 3) 접착 면적 40mm, 60mm인 CFC와 UHMWPE 시편의 진동 응답 특성은 사전에 알지 못한다고 가정한다.
- 4) 접착 면적 20mm인 기준 시편 AI과 대상 시편 CFC, UHMWPE 간의 주파수 축과 진동 응답을 스케일 하는 비선형 변환 함수를 정의할 수 있다. 여기서 정의된 비선형 변환 함수를 알지 못하는 면적의 대상 시편에 적용하게 된다. 알지 못하는 접착 면적은 20mm, 40mm, 60mm 일수도 있다고 가정한다.

위 가정들을 가지고 비선형 변환 함수가 적용된 대상시편은 고유진동 모드 차수와 진동 특성이 기준 시편과 유사하게 변환되는 것을 확인할 수 있다. 위 방법을 이용하여 접착 면적에 대한 대략적인 판단을 수행하고 나서 변환된 주파수 응답 함수의 차이를 이용하여 스펙트로그램을 생성했다. 이 스펙트로그램을 사용하여 CNN 기반 딥러닝을 통해 접착 면적을 알아내는 과정은 2.5.3장에서 설명한다.

2.5.2 비선형 변환

이 장은 대상 시편의 접착 면적을 탐지하기 위해 기준이 될 AI 시편 사이의 비선형 변환(Nonlinear transformation)을 제시한다. 여기에서 정의된 비선형 변환은 접착 면적을 결정하기 위해 알려지지 않은 탐지 대상 시편의 신호에 적용된다. 주파수 응답 함수에서 동일 접착 면적을 갖는 기준 시편과 다른 재료의 대상 시편 신호를 일치시키기 위한 비선형 변환을 정의해야 한다. 대상 시편의 고유 진동수를 기준 시편의 고유 진동수와 일치시키고, 주파수 응답 함수의 기울기가 서로 일치하도록 하는 것을 목표로 한다. 일반성을 고려하여 다음 주파수 응답 함수를 가정한다. (2)

Shifting of angular speed:

$$\tilde{\omega}_T = \left(\frac{H_R^{-1}(Y_{max}^R)}{H_T^{-1}(Y_{max}^T)} \right) \cdot \omega_T \quad (1)$$

Shifting and scaling of amplitude:

$$\tilde{Y}_T = \left(\frac{Y_{max}^R - Y_{min}^R}{Y_{max}^T - Y_{min}^T} \right) \cdot Y_T \quad (2)$$

여기서, 주파수 응답과 전달 함수는 각각 Y와 H로 표시된다. 또한, 주파수는 ω 로 표시된다. 먼저, 주파수 이동과 주파수 응답의 이동 및 스케일링을 통해 기준 시편의 신호와 대상 시편의 신호 간의 피크 주파수와 진폭을 일치시킨다. 여기서 대상

시편의 주파수 응답과 전달 함수는 각각 Y_T 와 H_T 로 표시된다. 기준 시편의 주파수 응답과 전달함수는 각각 Y_R 와 H_R 로 표시된다. 기준 시편과 대상 시편의 최대 주파수 응답은 각각 Y_{max}^R , Y_{max}^T 로 표시되고 각 시편의 최소 주파수 응답은 각각 Y_{min}^R 및 Y_{min}^T 으로 표시된다. 대상 시편의 주파수는 ω_T 로 표시된다.

접착 면적이 20mm인 기준 AI 시편과 비선형 변환된 접착 면적이 20mm인 CFC와 UHMWPE 대상 시편의 주파수 응답은 유사하게 변환된다. 이렇게 변환되는 이유는 식 (1)에 의해 고유 진동수가 일치하게 되고 식 (2)에 의해 기울기가 유사해진다. 비록 이 방법을 사용했을 때 주파수 응답 함수가 일치하게 되지는 않지만 대략적인 분류가 가능하여 접착 면적 탐지 시스템에 사용하기엔 충분하다고 판단했다. 접착 면적이 40mm, 60mm인 경우에도 20mm에서 정의된 비선형 변환 함수를 CFC와 UHMWPE 시편에 적용하면 AI 시편의 40mm, 60mm와 유사한 거동을 보인다. 이를 통해, 대상시편의 접착 면적이 변화할 지라도 비선형 변환 방법을 통해 시편이 가지는 고유한 진동 특성도 유사한 비율로 변환되는 것을 확인할 수 있었다.

2.5.3 가상의 스펙트로그램을 이용한 CNN 기반 딥러닝

이 장은 주파수 응답 함수의 차이를 이용해 가상의 스펙트로그램으로 변환하는 과정과 이 변환된 데이터를 활용하여 CNN 기반 딥러닝을 통해 접착 면적을 판단하는 방법을 제시한다. 스펙트로그램(Spectrogram)은 소리나 파동을 STFT(Short Time Fourier Transform)를 이용하여 시각화하기 위해 주로 사용되며 시간에 따른 주파수 성분을 알 수 있다. 이 연구에서는 기존의 스펙트로그램과 다르게 사용했으며 Fig. 7과 같이 서로 다른 주파수 응답 함수의 차이를 가지고 STFT의 변환을 통해 가상의 스펙트로그램을 생성했다. 이 방법을 사용한 이유는

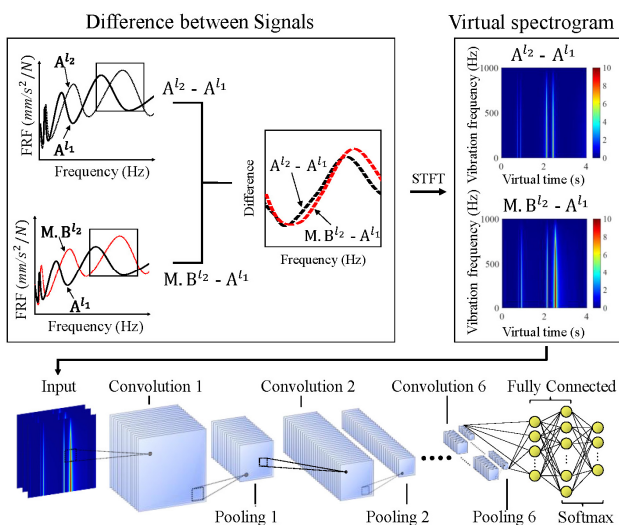


Fig. 7 CNN architecture using virtual spectrograms

Table 3 Details of CNN architecture

Layer Name	Layer Description
Input	256×256×3 Virtual spectrogram image
Convolution 1, Pooling 1	Convolution Filter 3×3, strides 1
	Number of filter=16, ReLU, Batch normalization
	Max Pooling Filter 2×2, strides 2
Convolution 2, Pooling 2	Convolution Filter 3×3, strides 1
	Number of filter=32, ReLU, Batch normalization
	Max Pooling Filter 2×2, strides 2
Convolution 3, Pooling 3	Convolution Filter 3×3, strides 1
	Number of filter=64, ReLU, Batch normalization
	Max Pooling Filter 2×2, strides 2
Convolution 4, Pooling 4	Convolution Filter 3×3, strides 1
	Number of filter=128, ReLU, Batch normalization
	Max Pooling Filter 2×2, strides 2
Convolution 5, Pooling 5	Convolution Filter 3×3, strides 1
	Number of filter=256, ReLU, Batch normalization
	Max Pooling Filter 2×2, strides 2
Convolution 6, Pooling 6	Convolution Filter 3×3, strides 1
	Number of filter=512, ReLU, Batch normalization
	Max Pooling Filter 2×2, strides 2
FullyConnected	Input=8192, Output = 2048, ReLU
Softmax	Input=2048, Output=2

기준 신호와 비선형 변환된 주파수 응답 함수의 차이를 이 가상의 스펙트로그램으로 시각화 할 수 있고 그 차이를 구분하는데 있어서 유리한 이점을 가진다.

본 연구에서 접착 면적을 진단하기 위해 MATLAB에서 제공하는 CNN을 사용했다. 이 네트워크를 훈련시키기 위해 가상의 스펙트로그램 2D 이미지를 사용했고 접착 면적 탐지 시스템은 AI와 CFC, AI와 UHMWPE 두 가지 시스템으로 구성된다. CNN의 아키텍처는 크게 컨볼루션 연산자, ReLU(Rectified Linear Unit), 풀링 계층 그리고 서브샘플링 계층과 완전 연결 계층으로 구성되어 있고 Table 3과 같이 가상의 스펙트로그램의 특징을 추출하기 위해 6개의 컨볼루션과 풀링 계층으로 구성되어 있다. 완전 연결 계층은 컨볼루션 계층과 풀링 계층에서 추출한 특징을 기반으로 접착 면적에 대한 케이스를 분류하는데 사용된다. 또한, 이 모델은 미니 배치 크기는 2, 학습률은 0.0001 및 Epoch는 20으로 훈련을 시켰고 3개의 클래스를 분류하기 위해 사용됐다.

3. 접착 면적 탐지 시스템 구성

3.1 접착 면적 탐지 기준: 알루미늄 시편

접착 면적 차이에 따른 고유 진동수를 확인하기에 앞서, 실

험하고자 하는 시편의 정확한 재료의 물성을 단일 시편을 통해 검증하고자 한다. 단일 시편은 적용가능한 분석적 해가 없기에 해석의 결과에 맞추기가 용이하다. Fig. 8은 단일 Al 시편을 이용한 진동실험의 결과이다. 진동실험(EX: Experiment), 분석적 해(AS: Analytical Solution) 그리고 유한요소해석(FEM: Finite Element Method)의 결과를 Table 4에 제시했다. Al의 경우 1% 낮은 오차 내에서 통일성을 보이며 해석 및 실험의 신뢰성을 확인했다.

Fig. 9는 Single-lap joint 시편의 접착 면적 변화에 따른 고유 진동수 변화를 확인하기 위해 접합될 각 Al 시편의 길이는 동일하고 접착 길이가 다를 때의 예제를 수행한 결과이다. 접착 길이는 20mm, 40mm 그리고 60mm로 설정했으며 접착제의 무게는 무시하여 접착된 시편의 중량은 모두 동일하다고 가정한다. 3가지 경우의 접착 면적 길이를 고려한 고유 진동수는 Table 5에 제시됐다. 구조물의 고유 진동수는 질량에 반비례하고 강성에 비례한다. 결과를 보면 외팔보의 굽힘 강성은 면적을 고려한 길이의 영향이 크다는 것을 확인할 수 있고 접착 면적이 증가하면 전체 길이의 변화가 생겨 고유 진동수가 달라지는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 10은 기준 시편인 20mm 접착 면적을 갖는 Al과 40mm, 60mm 접착 면적 Al의 주파수 응답의 차이를 이용해 가상의 스펙트로그램을 생성했다. 접착 면적이 20mm인 시편을 기준으로 하여 변화되는 접착 면적이 증가할수록 진동 응답의 차이가 나타나는 것이 확인됐다. 가상의 스펙트로그램은 Fig. 10(a)에

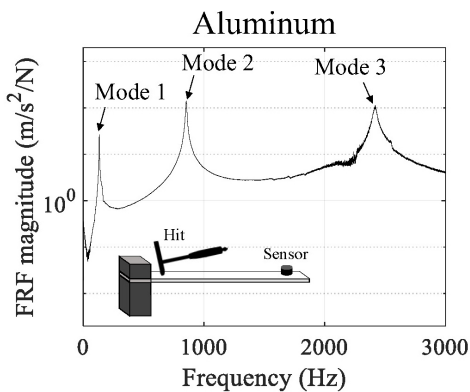


Fig. 8 Frequency response function of the single Al specimen

Table 4 Resonance frequencies within the 3rd mode using experiment, analytical solution and FEM

Material	Method	Resonance Frequency(Hz)		
		Mode1	Mode2	Mode3
Al 6101	EX	133.25	853.25	2418
	AS	137.20	860.90	2407.7
	FEM	137.95	862.29	2406.4

서 0~500Hz와 Fig. 10(b)에서 0~1000Hz로 두 가지의 주파수 범위로 확인했다. 두 주파수 범위를 사용한 이유는 CFC와 UHMWPE에서의 진동분석을 고려하기 위함이다. 이 가상의 스펙트로그램은 CFC와 UHMWPE의 접착 면적을 탐지하기 위한 훈련 데이터 세트로 사용된다.

3.2 접착 면적 탐지 대상: 탄소섬유복합재 시편

Fig. 11은 접착 면적이 20mm, 40mm 그리고 60mm인 CFC의 진동실험 결과를 주파수 응답으로 나타낸 것이다. 또한 접착 면적에 따른 고유 진동수의 각 모드의 실험과 유한요소해석

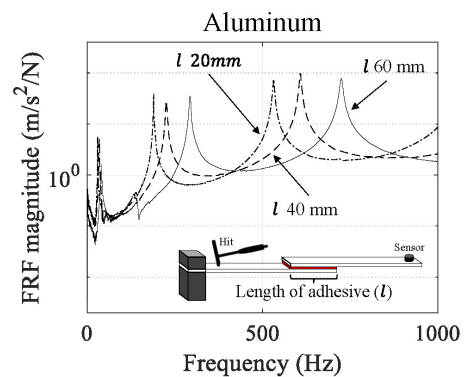


Fig. 9 Frequency response functions of the single lap jointed Al specimens considered by lengths of adhesive areas

Table 5 Resonance frequencies of Al's within the 3rd mode considered by lengths of adhesive areas using experiment and FEM

Material	l (mm)	Method	Resonance frequency(Hz)		
			Mode1	Mode2	Mode3
Al 6101	20	EX	29.75	189.5	531.50
		FEM	29.26	176.57	516.55
	40	EX	34.25	224.75	608.25
		FEM	33.66	206.24	591.67
	60	EX	40.25	293.25	725.00
		FEM	39.18	255.07	678.32

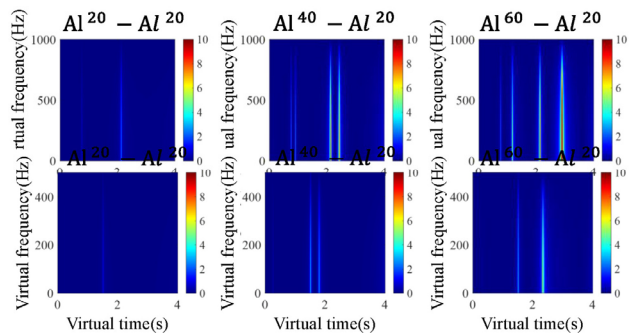


Fig. 10 Virtual spectrograms generated by difference between FRFs with three cases of Al adhesive area

의 결과를 Table 6에 제시했다. AI와 CFC는 재료의 차이로 인해 다른 진동특성을 가지며 주파수 응답 또한 다르게 나타난다. 두 재료의 다른 진동 특성 때문에 Law 데이터를 바로 비교하여 탐지하는 것은 많은 어려움이 존재한다. 특히, 어떤 구조물의 신호 데이터를 훈련시키고 다른 구조물의 신호 데이터를 테스트하는 것은 매우 어려운 문제이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 비선형 변환을 적용하여 데이터 부족의 문제를 해결하면서 동시에 진동 특성을 유사하게 변환시켜 다른 구조물의 이상을 탐지할 수 있는 방법을 사용했다.

Fig. 12(a)는 접착 면적이 20mm일 때, CFC의 주파수 응답을 AI의 주파수 응답과 유사하게 변환시키는 비선형 변환 과정을 보여준다. 이 과정에서 얻은 비선형 변환 함수를 CFC 40mm와 60mm에 동일하게 적용하면 기준 AI 시편의 고유 진동수와 일치하게 되고 기울기가 유사하게 변환되는 것을 Fig. 12(b)에서 확인할 수 있다.

Fig. 13은 비선형 변환이 적용되지 않은 CFC 신호를 사용했고, Fig. 14는 비선형 변환된 CFC의 신호를 사용하여 CNN을 통해 테스트했다. 그 결과는 다음과 같이 혼동 행렬로 제시했고 비선형 변환이 적용되지 않을 때의 정확도는 66.7%, 비선형 변환이 적용됐을 때의 정확도는 100%라는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 비선형 변환을 적용시 사전에 어느 정도 분류

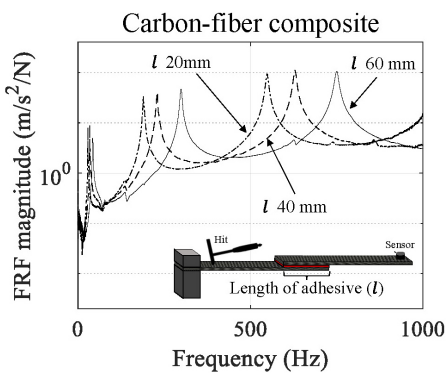


Fig. 11 Frequency Response functions of the single lap jointed CFC specimens considered by lengths of adhesive areas

Table 6 Resonance frequencies of CFCs within the 3rd mode considered by lengths of adhesive areas using experiment and FEM

Material	l (mm)	Method	Resonance frequency(Hz)		
			Mode1	Mode2	Mode3
CFC	20	EX	28.59	189.37	548.43
		FEM	37.99	227.64	668.20
	40	EX	34.45	230.15	628.82
		FEM	43.63	263.36	763.96
	60	EX	41.95	298.82	750.45
		FEM	50.62	318.80	871.47

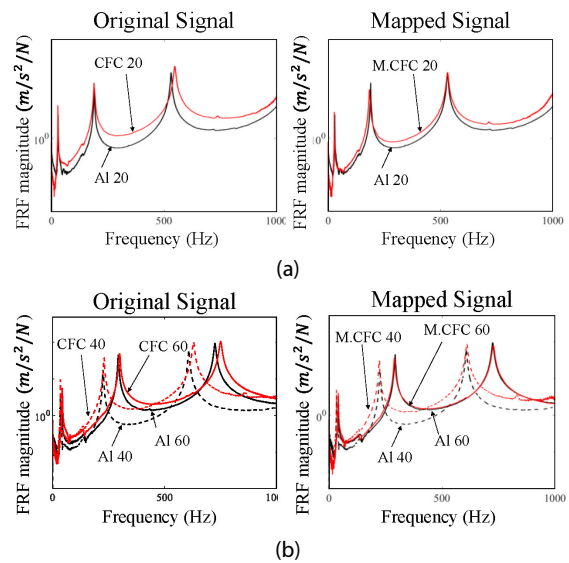


Fig. 12 Process of nonlinear transformation with AI signals and CFC signals. (a) Mapping process of reference signals of AI 20mm and signals of CFC 20mm and (b) mapping process of reference signals of AI 40mm, 60mm and signals of CFC 40mm, 60mm

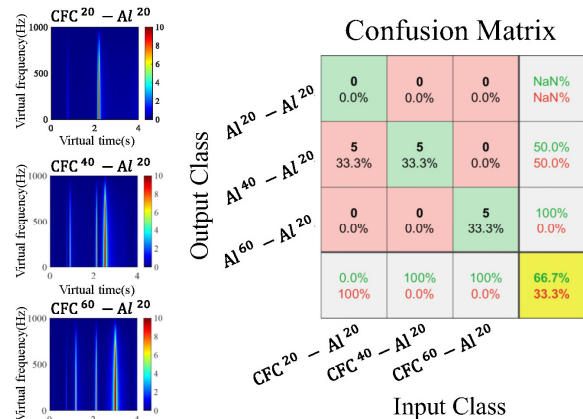


Fig. 13 The confusion matrices of the virtual spectrograms generated by the differences between AI signals and CFC signals

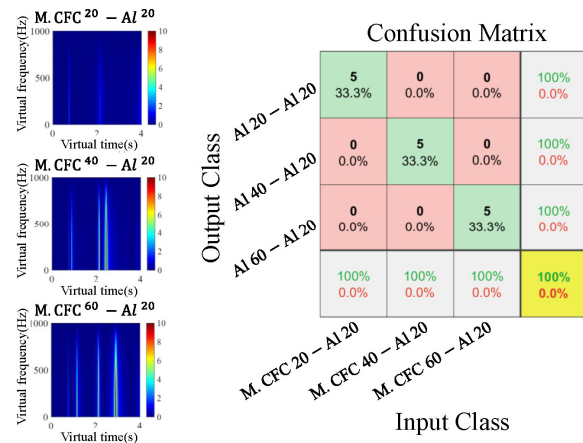


Fig. 14 The confusion matrices of the virtual spectrograms generated by the differences between AI signals and Mapped CFC signals

가 가능하기 때문에 CNN을 사용시 매우 정확하게 접착 면적 탐지가 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 접착 면적 탐지 대상: 초고분자량 폴리에틸렌 시편

앞선 예제는 실험을 통해 접착 면적 차이에 따른 고유 진동수 변화를 확인하고, 비선형 변환과 CNN을 통해 접착 면적 탐지의 판단 결과를 제시했다. 이 예제는 유한요소해석의 결과만으로 재료가 다른 시편에서의 접착 면적을 알아낼 수 있는지를 확인하고자 한다.

UHMWPE 시편은 앞선 예제와 동일한 조건을 가질 수 있도록 유한요소해석을 이용하여 가진 실험을 가정했다. 실험과

동일하게 구속조건, 가진 위치, 가속도 측정 위치 그리고 감쇠비를 설정하여 주파수 응답의 결과를 확인했다. 접착 면적 차이에 따른 주파수 응답은 Fig. 15와 같다. Fig. 16을 보면 비선형 변환 함수를 사용했을 때 접착 면적에 따른 신호가 기준 AI 시편의 신호들과 유사한 주파수 응답으로 변환된 것을 확인할 수 있다. 유한요소해석 시 진동실험의 경계조건 불확실성으로 인한 신뢰하기 힘든 주파수 응답이 없기 때문에 0~500Hz의 짧은 주파수 범위를 사용했다. 접착 면적 탐지 시스템의 결과는 Fig. 17와 Fig. 18에 제시됐다. 이 결과에서 UHMWPE 시편은 비선형 변환이 적용되지 않았을 때 33.3%, 비선형 변환을 적용했을 때에는 100%로 접착 면적을 탐지할 수 있었다.

4. 결론

본 연구는 비선형 변환 접근의 딥러닝 방법을 사용하여 single lap joint 형상을 가진 다양한 시편의 접착 면적을 탐지할

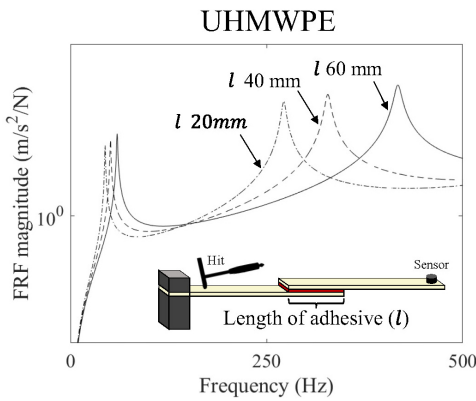


Fig. 15 Frequency Response functions of the single lap jointed UHMWPE specimens considered by lengths of adhesive areas

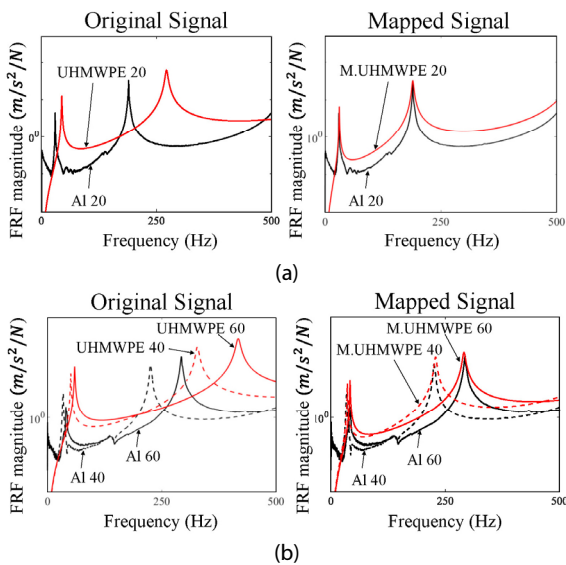


Fig. 16 Process of nonlinear transformation with AI signals and UHMWPE signals. (a) Mapping process of reference signals of AI 20mm and signals of UHMWPE 20mm and (b) mapping process of reference signals of AI 40mm, 60mm and signals of UHMWPE 40mm, 60mm

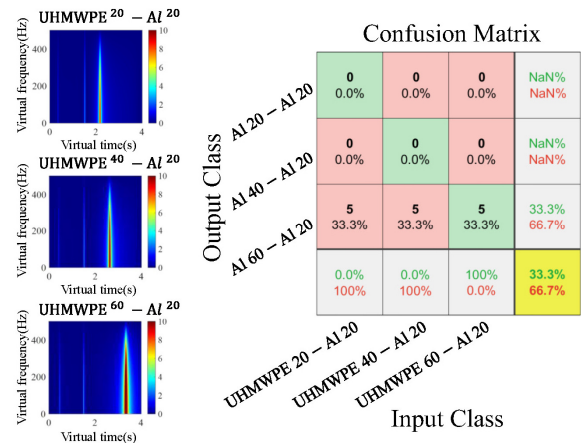


Fig. 17 The confusion matrices of the virtual spectrograms generated by the differences between AI signals and UHMWPE signals

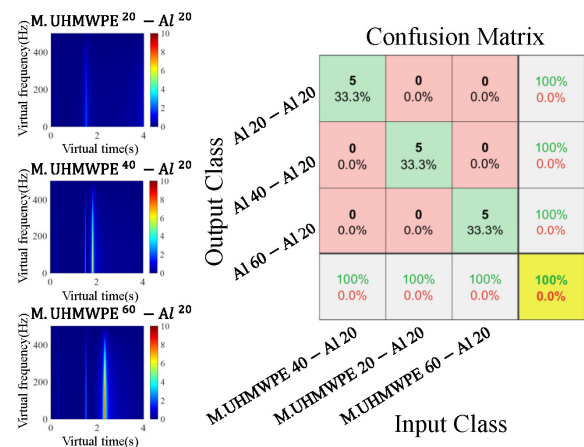


Fig. 18 The confusion matrices of the virtual spectrograms generated by the differences between AI signals and Mapped UHMWPE signals

수 있는 시스템을 개발했다. 산업 또는 기계공학 분야에서 물리적인 제한으로 구조물 내에서의 보이지 않는 부분의 결함이나 접착 상태를 확인하기 어렵다. 이러한 문제를 다루기 위해 진동 기반 실험, 분석적 해, 유한요소방법을 사용하여 AI, CFC, UHMWPE의 접착 면적을 알아내는 연구를 제시했다. 진동 분석은 주파수 응답 함수를 사용하여 모드에 따른 고유 진동수를 확인하는 방법을 사용했으며 이 주파수 응답 함수를 이용하여 기준 시편의 3가지 접착 면적에 대한 진동 응답과 대상 시편들의 3가지 접착 면적에 대한 진동 응답을 분석했다. 접착 면적을 알아내기 위해 기준 시편인 AI 20mm와 대상 시편인 CFC, UHMWPE 20mm 간의 비선형 변환 함수를 정의했고 대상 시편의 40mm, 60mm에 적용하여 대략적인 분류를 진행했다. 이 분류된 신호는 STFT를 통해 가상의 스펙트로그램으로 시각화했고 이 이미지 데이터는 CNN 기반 딥러닝 알고리즘을 통해 혼동 행렬의 결과로 나타났으며 접착 면적 탐지 정확도를 알 수 있었다. 비선형 변환이 적용되지 않았을 때 CFC, UHMWPE은 각각 66.7% 그리고 33.3%, 비선형 변환이 적용된 경우 두 시편 모두 100% 정확도로 접착 면적을 탐지할 수 있었다. 이 결과를 통해 개발한 접착 면적 탐지 시스템의 활용 가능성을 제시했고 향후 연구에서는 이 접착 면적 탐지 시스템의 성능을 발전시켜 다양한 형상의 접착 결함과 위치를 알아 낼 수 있는 방법으로 개발될 것이다.

감사의 글

이 논문은 2021년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 20-407-C00-006, 착용로봇 일체형 장갑 방호기술 개발).

References

- Bauchau, O.A., Craig, J.I.** (2009) Euler-Bernoulli Beam Theory, *Struct. Anal.*, pp.173~221.
- Du, Y., Shi, L.** (2014) Effect of Vibration Fatigue on Modal Properties of Single Lap Adhesive Joints, *Int. J. Adhes. & Adhes.*, 53, pp.72~79.
- Kim, D.Y., Woo, Y.J., Kang, K., Yoon, G.H.** (2022) Failure Diagnosis System using a New Nonlinear Mapping Augmentation approach for Deep Learning Algorithm, *Mech. Syst. & Signal Proc.*, 172, 108914.
- LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.** (2015) Deep Learning, *Nature*, 521(7553), pp.436~444.
- Nguyen, L.H., Lässig, T.R., Ryan, S., Riedel, W., Mouritz, A.P., Orifici, A.C.** (2016) A Methodology for Hydrocode Analysis of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene Composite under Ballistic Impact, *Compos. Part A: Appl. Sci. & Manuf.*, 84, pp.224~235.
- Oosterom, R., Ahmed, T.J., Poulis, J.A., Bersee, H.E.N.** (2006) Adhesion Performance of UHMWPE after Different Surface Modification Techniques, *Med. Eng. & Phys.*, 28(4), pp. 323~330.

요 지

본 연구는 딥러닝을 위한 비선형 변환 접근법을 사용하여 Single-lap joint의 접착 영역을 조사하기 위한 진동 응답 기반 탐지 시스템을 제시한다. 산업 혹은 공학 분야에서 분해가 쉽지 않은 구조 내에 보이지 않는 부분의 상태와 접착된 구조의 접착 부위 상태를 알기 어려운 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구는 비선형 변환을 이용하여 기준 시편의 진동 응답으로 다양한 시편의 접착 면적을 조사하는 탐지 방법을 제안한다. 이 연구에서는 CNN 기반 딥러닝으로 진동 특성을 파악하기 위해 비선형 변환을 적용한 주파수 응답 함수를 사용했고 분류를 위해 가상의 스펙트로그램을 사용했다. 또한, 제시된 방법을 검증하기 위해 알루미늄, 탄소섬유복합재 그리고 초고분자량 폴리에틸렌 시편에 대한 진동 실험, 분석적 해, 유한요소해석을 수행했다.

핵심용어 : 비선형 변환, 주파수 응답 함수, 접착 면적, 합성곱 신경망

