

정상 웨이블릿 변환을 이용한 항공기 FBG 센서의 변형을 탐지 정확도 향상

Improvement of Strain Detection Accuracy of Aircraft FBG Sensors Using Stationary Wavelet Transform

손영준¹ · 신현성² · 홍교영^{3*}

¹한서대학교 대학원 항공시스템공학과

²(주)유콘시스템

³한서대학교 항공전자공학과

Yeong-Jun Son¹ · Hyun-Sung Shin² · Gyo-Young Hong^{3*}

¹Department of Aviation system Engineering, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 31962, Korea

²Uconsystem, Deajeon, 34015, Korea

³Department of Avionics, Hanseo University, Chungcheongnam-do, 31962, Korea

[요 약]

구조 건전성 모니터링 기술을 이용하여 항공기의 유지 보수 비용을 줄이고 항공기의 가동률을 높이고자 하는 많은 연구가 진행되고 있다. 이에 FBG 센서에 대한 많은 연구가 함께 진행되고 있다. 하지만 복합재 내부에 FBG 센서를 설치할 경우, 복합재 층 사이에 보이드(void)가 발생하게 되고 이로 인해 신호 갈라짐 (split problem)이 발생하게 된다. 또한, FBG 센서는 전자기파에 영향을 받지 않지만, 후속처리 과정에서 사용되는 전자장비에 의한 전자기파 잡음이 발생하게 된다. 본 논문에서는 이러한 잡음으로 인한 오차를 줄이기 위해 이동 불변의 특성을 지니고 비선형적인 신호분석에 효율적인 정상 웨이블릿 변환 기법을 제시하였다. 그리고 위 상황에서 웨이블릿 패킷 변환과 비교하였을 경우 정상 웨이블릿 변환의 잡음 제거 성능이 더 우수한 것을 확인하였다.

[Abstract]

There are many studies that use structure health monitoring to reduce maintenance costs for aircraft and to increase aircraft utilization. Many studies on FBG sensors are also being conducted. However, if the FBG sensor is installed inside the composite, voids will occur between the layers of the composite, resulting in signal split problem. In addition, the FBG sensor is not affected by electromagnetic waves, but will produce electromagnetic noise caused by electronic equipment during post-processing. In this paper, to reduce the error caused by these noises, the stationary wavelet transform, which has the characteristics of movement immutability and is efficient in nonlinear signal analysis, is presented. And in the above situation, we found that noise rejection performance of stationary wavelet transform was better compared with the wavelet packet transform.

Key word : Structural health monitoring, Fiber bragg grating, Stationary wavelet transform, Wavelet packet transform, Flight test.

<https://doi.org/10.12673/jant.2019.23.4.273>



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.

Received 6 August 2019; Revised 7 August 2019

Accepted (Publication) 25 August 2019 (30 August 2019)

*Corresponding Author; Gyo-young Hong

Tel: +82-41-671-6232

E-mail: kiathgy@hanseo.ac.kr

I. 서론

항공기의 유지 보수 및 관리에 대한 과도한 비용이 소요되어 항공기의 가동률이 낮다는 문제점을 해결하기 위해 탄소섬유와 같은 복합소재가 주목받고 있다[1]. 이러한 복합소재는 기체의 수명을 연장시키고 항공기의 유지 보수 및 점검비용을 절감시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 Airbus, Boeing과 같은 대형 항공기 제작사뿐만 아니라 국내에서 제작한 T-50 고등훈련기 역시 일부 복합소재가 사용되었다[2]. 복합소재는 저에너지 충격 시 충격지점이 탄성에 의해 복원되기 때문에 외관상으로 볼 때 정상적인 상태로 보인다. 그러나 내부를 자세히 살펴보면 미세 균열 및 층간 분리 등의 BVID (barely visible impact damage) 결함이 발생할 수 있다[3].

이러한 결함 사항들을 조종사 및 정비사에게 알려주기 위해 SHM(structural health monitoring) 기술이 개발되었다. SHM 기술은 센서를 항공기 내부에 삽입 또는 외부에 부착시켜 결함을 실시간으로 감시, 진단할 수 있다[3]. 이러한 SHM 기술을 효과적으로 이용하기 위한 센서로 FBG (fiber bragg grating) 센서가 각광 받고 있다. FBG 센서는 민감도가 높으므로 저에너지 충격의 충격지점 검출에 탁월하다[4]. 또한, 여러 개의 센서를 하나의 광섬유 라인에 설치할 수 있는 멀티플렉싱이 가능해서 구조물이 대형화되어도 다점측정이 용이하며 경제적이다. 그리고 전자기파의 영향을 받지 않으므로 잡음이 많은 환경에서도 사용할 수 있다는 장점이 있다[4].

FBG 센서 자체는 전자기파의 영향을 받지 않지만, 데이터를 추출하는 과정에서 광원, 광 검출기, 신호처리장치처럼 전원을 사용하는 전자장비의 경우 전자기파의 영향을 받아 잡음이 발생하게 된다[3]. 또한, 복합소재의 적층판 사이에 FBG 센서를 설치할 경우, 접착된 층과 층 사이에 수많은 보이드(void)와 미접착 부분이 생긴다. 그리하여 FBG 센서의 신호가 왜곡되고 반사 파장의 신호 갈라짐(split problem) 현상이 발생하게 된다. 이러한 문제로 반사 파장 신호의 대역폭이 변하게 되고 구조물 상태 예측에 오차가 발생한다[5].

이에 본 논문에서는 FBG 센서 잡음을 효율적으로 제거하기 위해 SWT(stationary wavelet transform) 기법을 사용하였다. SWT 기법은 WPT(wavelet Packet transform) 기법과 달리 다운 샘플링을 수행하지 않는다. 따라서 연산량이 많아지고 처리시간이 많이 필요하지만, 이동 불변의 특성을 가진다[6]. FBG 센서는 충격 물리량에 따라 중심파장의 피크값이 천이(shift) 되는 원리를 이용하므로 이동불변의 특성을 가진 SWT를 선정하였다. 또한, 비행시험에서의 데이터 처리를 위하여 지상에서 항공기 날개 내부에 삽입되어있는 FBG 센서를 이용하여 실험을 진행하였다.

II. 웨이블릿 기반 잡음 제거 기법

2-1 웨이블릿 변환

웨이블릿 변환은 1980년대 초 Morlet에 의해 소개된 웨이블릿 이론으로 지진의 데이터를 구하기 위해 사용되었다. 신호처리 분야에서 가장 대중적으로 사용되는 푸리에 변환은 신호의 시간적 정보나 주파수 정보만을 제공하지만, 웨이블릿 변환은 시간 영역과 주파수 영역의 정보를 함께 제공해준다. 또한, 주파수에 대하여 다양한 창(window)을 적용하고 시간, 주파수 해상도를 신호에 맞게 설계할 수 있다.

웨이블릿 변환은 부분적인 시간 영역에서 주파수 영역을 해석할 수 있고 급격히 변하는 신호의 분석에 효과적이다[7]. 그리하여 항공기 날개에 가해지는 물리량의 변화만큼 반사 파장이 천이(shift) 되는 FBG 센서에 적용하기 위한 적절한 기법으로 판단된다.

2-2 웨이블릿 패킷 변환

웨이블릿 패킷 변환이란 Ronald coifman과 Wickerhauser에 의해 제안된 기법이다. 기존의 많은 연구에서 사용되는 이산 웨이블릿 변환(DWT : discrete wavelet transform) 보다 고주파 대역에서 주파수를 더욱 자세히 분석할 수 있다. 이산 웨이블릿 변환이 저 대역 부분만을 계속 분할 해 나가는 방식과는 달리, 웨이블릿 패킷 변환은 고 대역 부분 또한 계속 분할 해 나가는 방식이다. 때문에, 다 해상도 분석을 더욱 일반화시켜 높은 분해능을 갖는다[8]. 그러므로 이산 웨이블릿 변환보다 더욱 풍부한 시간-주파수의 국소 정보를 얻을 수 있다. 또한, 고주파 대역을 더욱 작은 대역으로 세분화하기 때문에 이산 웨이블릿 변환보다 고주파 성분을 갖는 잡음 제거에 효과적이다[9].

스케일링 함수는 저주파 대역을 통과하게 되는 함수이고 웨이블릿 함수는 고주파 대역을 통과하게 되는 함수이다. 이때 스케일링 함수를 $W_0(t) = \phi(t)$ 라하고 웨이블릿 함수를 $W_1(t) = \psi(t)$ 라 하면 $W_m(t), m = 0, 1, 2, \dots$ 는 식(1)과 식(2)로 표현할 수 있다.

$$W_{2m}(t) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} g(n) W_m(2t-n) \tag{1}$$

$$W_{2m+1}(t) = 2 \sum_{n=0}^{2N-1} h(n) W_m(2t-n) \tag{2}$$

이산 웨이블릿 변환과 웨이블릿 패킷 변환은 각각 그림 1과 그림 2와 같은 분해과정을 갖는다.

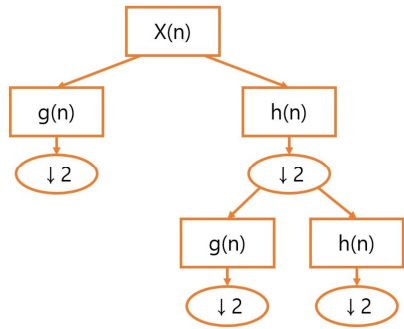


그림 1. 이산 웨이블릿 변환
Fig. 1. Discrete wavelet transform.

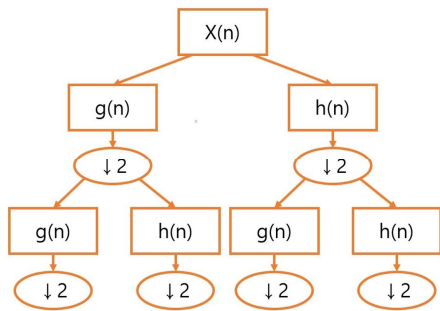


그림 2. 웨이블릿 패킷 변환
Fig. 2. Wavelet packet transform.

2-3 정상 웨이블릿 변환

정상 웨이블릿 변환은 이산 웨이블릿 변환과 웨이블릿 패킷 변환이 원신호를 완벽히 보존할 수 없다는 단점을 보완할 수 있다. 이산 웨이블릿 변환과 웨이블릿 패킷 변환은 신호를 한 단계씩 분해할 때마다 다운 샘플링을 수행한 후 다시 역 변환하는 과정에서 데이터 손실이 발생한다. 즉, 원신호에 손상이 생긴다는 것이다. 각 단계를 수행하면서 다운 샘플링을 수행하기 때문에 이동 변이(shift variance) 현상이 발생하게 된다[10].

반면 정상 웨이블릿 변환은 다운 샘플링 없이 기존의 웨이블릿 특성은 유지하면서 이동 불변의 특성을 가지기 때문에 이산 웨이블릿 변환과 웨이블릿 패킷 변환의 이동 변이 현상 문제를 해결할 수 있다[10]. 정상 웨이블릿 변환은 다운 샘플링을 수행하지 않기 때문에 연산량이 많아 이산 웨이블릿 변환과 웨이블릿 패킷 변환보다 처리시간이 오래 걸리는 단점이 있다. 그러나 FBG 센서는 반사 파장이 천이 되는 원리를 이용해 충격에 따른 물리량을 측정하므로 이동 불변의 특성을 지닌 정상 웨이블릿 변환 기법을 사용하는 것이 더 효율적이다. 그림 3은 정상 웨이블릿 변환의 분해과정이고, 정상 웨이블릿의 식은 식(3)과 식(4)와 같이 표현된다.

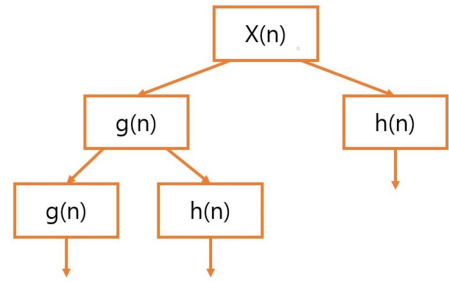


그림 3. 정상 웨이블릿 변환
Fig. 3. Stationary wavelet transform.

$$c_{j+1,k} = \sum_l h(l)c_{j+1,k+2^j l} \tag{3}$$

$$d_{j+1,k} = \sum_l g(l)c_{j+1,k+2^j l} \tag{4}$$

2-4 웨이블릿 기반 잡음 제거

웨이블릿 잡음 제거 기법은 잡음이 상대적으로 고주파에 많이 분포되어있는 점을 이용한다. 신호를 웨이블릿 도메인으로 재구성하고 상세계수를 수정해서 잡음을 제거한다. 웨이블릿 변환이 W라면 웨이블릿 계수는 $Y_i = W_{yi}$ 로 선형 변환될 수 있고 $W_{yi} = A_{wi} + D_{wi}$ 의 웨이블릿 근사 계수, 상세 계수를 가지게 된다. 근사 계수는 저 대역 부분의 웨이블릿 계수를 나타내고, 상세 계수는 고 대역 부분의 웨이블릿 계수를 나타낸다 [11].

잡음을 제거하기 전 각 계수들을 특성에 따라 분류하는데 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째는 “신호의 중요한 정보를 가지고 있는 계수”, 두 번째는 “중요하지 않으며 잡음의 영향을 많이 받는 계수”이다. 두 번째에 대한 임계값 설정을 통해 임계값보다 작은 절댓값을 가지는 계수들을 제거한다. 즉, 임계값 ‘δ’보다 작은 계수들을 잡음으로 판단하여 0으로 대체시키는 것이다. 이때 신호의 중요한 정보를 가지고 있는 계수들은 임계값보다 위에 존재하는 것이 일반적이기 때문에 다시 역변환하면 잡음이 제거된 신호가 된다[10].

임계값 설정에 관하여 기존의 웨이블릿 변환을 다룬 대부분 논문은 hard threshold보다 soft threshold의 우수성을 강조하였다. 그러나 hard threshold는 오차 기댓값을 최소화할 수 있고 피크값을 보존하는데 탁월하며 하드웨어 구성 시 soft threshold보다 간단하게 구현할 수 있다는 장점이 있다. soft threshold의 경우에는 hard threshold보다 잡음 제거 능력은 뛰어나지만 피크값을 보존하기 힘들다는 단점이 있다[12]. 본 논문에서는 FBG 센서가 충격 물리량에 따른 중심파장의 변화를 최대한 보존하고 잡음을 제거하기 위해 hard threshold 기법을 적용하였다. 다음은 웨이블릿 잡음제거 알고리즘을 세 단계로 나타낸 것이다 [6],[10].

1) 잡음 신호에 대하여 정상 웨이블릿 변환 수행

$$Y = X(\text{원신호}) + V(\text{노이즈신호})$$

$$SWT(Y) = W_y \tag{9}$$

2) 변환 영역에서 계수 Thresholding

Hard thresholding 기법과 Soft thresholding 기법의 임계화 기법 수식은 다음과 같다. (c_i : 웨이블릿 계수, δ : 임계값)

Hard thresholding 기법:

$$c_i = \begin{cases} 0, & \text{If } |c_i| < \delta \\ c_i, & \text{If } |c_i| \geq \delta \end{cases} \tag{10}$$

Soft thresholding 기법:

$$c_i = \begin{cases} 0, & \text{If } |c_i| < \delta \\ \text{sign}(c_i) (|c_i| - \delta), & \text{If } |c_i| \geq \delta \end{cases} \tag{11}$$

3) 마지막으로 임계화된 계수들 역 변환

$$ISWT(\tilde{x}) = W^{-1}(\tilde{X}) \quad (\tilde{x}: \text{임계화된 계수}) \tag{12}$$

hard threshold 기법은 임계값 ‘ δ ’보다 작은 절댓값을 갖는 웨이블릿 계수들은 0으로 대체되고, 임계값보다 큰 절댓값을 갖는 웨이블릿 계수들은 원래의 값을 갖게 된다. soft threshold 기법은 임계값 ‘ δ ’보다 작은 절댓값을 갖는 웨이블릿 계수들은 hard threshold와 동일하게 0으로 대체되고, 임계값보다 큰 절댓값을 갖는 웨이블릿 계수들은 임계값과의 차이만큼 수축 (shrinkage)하게 된다[10].

III. FBG 센서

3-1 FBG 센서의 구조

일반적인 FBG 센서는 코어, 클래딩, 재킷으로 구성되어 있으며 코어와 클래딩의 주성분은 유리이다. 재킷은 아크릴이나 폴리머로 구성되어 있으며 코어와 클래딩을 외부의 충격으로부터 보호해준다[13]. FBG 센서는 광섬유 표면에 자외선 레이저를 조사하여 코어에 주기적인 격자(grating)를 생성한다[14]. 광원에서 코어에 빛을 보내면 빛은 광섬유의 코어를 통하여 전파된다. 이때 빛의 손실 없이 전파되기 위해서는 코어에서 클래딩으로 전반사(total reflection)가 이루어지도록 해야 한다[13].

3-2 FBG 센서의 원리

레이저 조사량에 따라 코어의 굴절률이 변하게 되고 여러 개의 경계면에서 광신호 일부분이 투과, 반사하게 된다. 이러한 과정을 거치기 때문에 다중간섭이 일어나게 되고 위상조건을 만족하는 파장만을 반사하게 된다. 광섬유 격자의 반사 파장에

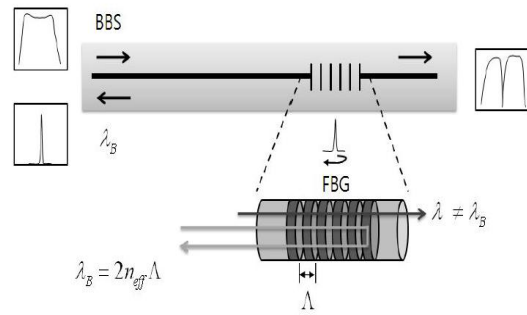


그림 4. FBG 센서의 반사 및 투과 원리[13]
Fig. 4. Reflection and transmission principle of FBG sensor.

대한 위상조건 식은 식 (13)과 같다.

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \tag{13}$$

λ_B 는 반사 파장, n_{eff} 는 유효굴절률, Λ 는 격자 간격이다. 식 (13)을 통해 반사 파장은 유효굴절률과 격자 간격의 함수임을 알 수 있다. 그림 4는 FBG 센서가 투과, 반사하는 과정을 표현한 그림이다. BBS는 broadband source를 의미하며 광원이 광섬유 격자에 입사한 후 반사되는 신호를 광 파장 분석기인 OSA (optical spectrum analyzer)를 이용하면 반사 파장의 스펙트럼을 확인할 수 있다[13].

IV. 실험 구성

실험은 한서대학교 태안비행장 격납고에서 수행하였으며, 비행시험에서의 데이터 처리 검증을 위해 지상에서 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 항공기는 복합소재를 이용하여 제작된 CTLs를 사용하였으며 항공기 날개 내부에 FBG 센서를 삽입하여 제작되었다. 그림 5는 실험에 사용된 시험용 CTLs 경량항공기의 사진이다.



그림 5. 시험용 CTLs 경량항공기
Fig. 5. CTLs Lightweight aircraft in test.

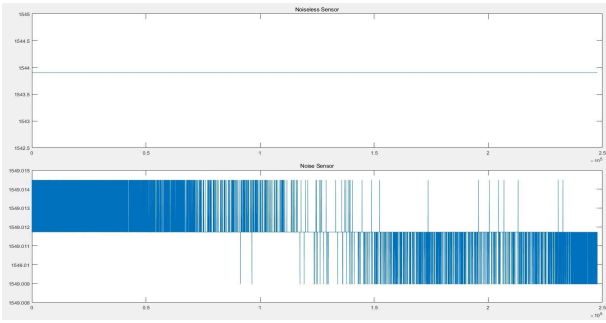


그림 6. 노이즈 유무 판단
Fig. 6. Determine whether noise exists.

동일한 시간과 환경에서 충격을 주지 않았을 때의 데이터를 획득하여 잡음이 없는 센서와 잡음이 많은 센서를 비교하여 잡음 유무를 판단하였다. 데이터는 초당 4000개의 데이터를 획득하였으며, 잡음 유무를 판단하기 위해 약 25만 개의 데이터를 분석하였다. 잡음으로 인한 오차가 크게 발생하는 센서에 임의의 충격을 가해 충격 전, 후 1초간의 데이터를 분석하였다. 그림 6은 잡음으로 인한 오차가 없는 센서와 잡음으로 인한 오차가 큰 센서를 비교한 그림이다.

웨이블릿 초기 설정 시 임계값을 매우 높게 설정하면 오히려 FBG 센서의 충격량이 줄어들어 정확한 피크값을 검출하지 못할 수 있다. 그림 7에서 볼 수 있듯이 임계값을 적절하게 설정하였을 경우 피크값이 1548.95107로 나타나지만 임계값을 높게 설정하였을 경우 피크값이 1548.97322에서 그치는 것을 확인할 수 있다. 따라서 적절한 임계값을 설정하기 위해 충격이 없는 시간대에서 FBG 센서에 잡음으로 인한 오차가 생기는 레벨 만큼을 분해 단계마다 임계값으로 적용하였다.

V. 실험 결과

5-1 SWT와 WPT 비교

그림 8, 9는 SWT와 WPT를 비교하기 위해 기존 논문에서 사용하였던 것과 동일한 hard threshold 기법을 적용하였고 임계값으로는 0.0042425를 사용하였다[15]. 분해를 3단계로 수행하였으며, db2를 모 웨이블릿으로 적용하여 분석하였다. 그림 8은 SWT를 적용한 그래프이고 그림 9는 WPT를 적용한 그래프이며 빨간색 그래프는 raw data이다. 그림 10에서 파란색 그래프가 SWT를 수행한 결과이고 초록색 그래프가 WPT를 수행한 결과이다. 그림 10을 이용하여 두 그래프를 확대하여 더 자세히 비교해보면 SWT가 WPT에 비해 잡음 제거가 더 탁월하며, 깎스 현상도 더 적게 일어나는 것을 확인할 수 있다. 표 1은 그림 10의 그래프에서 624~637을 수치로 표현한 것이다.

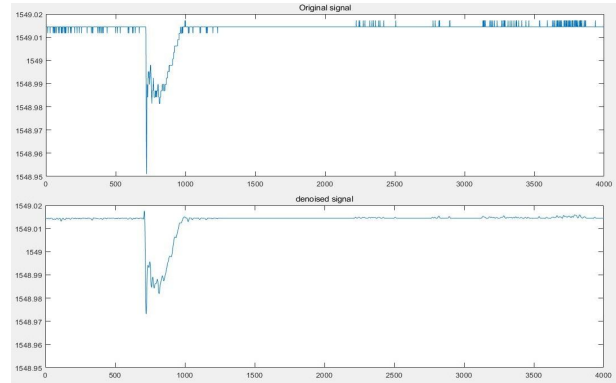


그림 7. 높은 임계값을 적용했을 경우
Fig. 7. When Apply a high threshold.

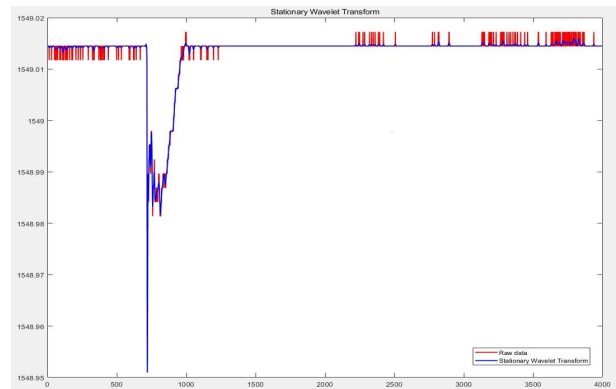


그림 8. SWT를 이용한 잡음제거(db2 wavelet, level3)
Fig. 8. Noise reduction using SWT(db2 wavelet, level3)

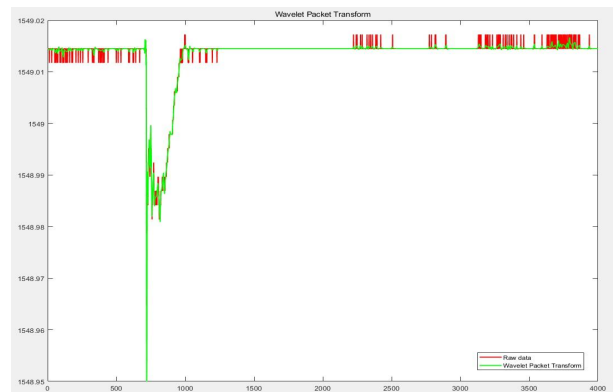


그림 9. WPT를 이용한 잡음제거(db2 wavelet, level3)
Fig. 9. Noise reduction using WPT(db2 wavelet, level3)

5-2 Hard threshold vs Soft threshold

그림 11, 12, 13은 SWT를 이용하여 db2 wavelet과 haar wavelet을 적용하였다. 그림 11, 12는 db2를 모 웨이블릿으로 이용하였고 그림 11은 hard threshold, 그림 12는 soft threshold를 적용하였다. hard threshold는 오차 기댓값을 최소화할 수 있

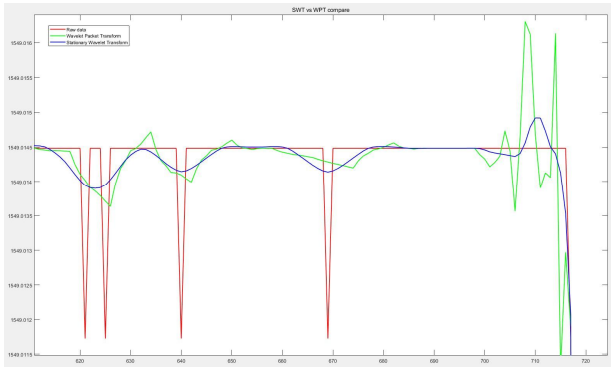


그림 10. SWT vs WPT
Fig. 10. SWT vs WPT

표 1. SWT와 WPT 수치 비교

Table 1. Comparison of SWT and WPT figures.

1/4000 (s)	IDEAL	SWT	WPT
624	1549.014484	1549.013901	1549.01386
625	1549.014484	1549.013911	1549.013793
626	1549.014484	1549.013951	1549.013712
627	1549.014484	1549.014028	1549.013635
628	1549.014484	1549.014122	1549.013969
629	1549.014484	1549.014221	1549.014192
630	1549.014484	1549.014315	1549.014305
631	1549.014484	1549.014385	1549.014448
632	1549.014484	1549.014437	1549.014481
633	1549.014484	1549.01447	1549.014543
634	1549.014484	1549.014466	1549.014635
635	1549.014484	1549.01443	1549.014719
636	1549.014484	1549.014379	1549.014466
637	1549.014484	1549.014321	1549.014303

고 피크값 검출이 탁월하므로 충격에 따른 물리량을 최대한으로 살릴 수 있다. 반면 soft threshold는 임계값만큼 계수가 수축하는 특성으로 인해 충격에 따른 물리량을 최대로 보존하지 못하였다. 그림 13은 haar를 모 웨이블릿으로 이용하고 hard threshold를 적용한 그림이다.

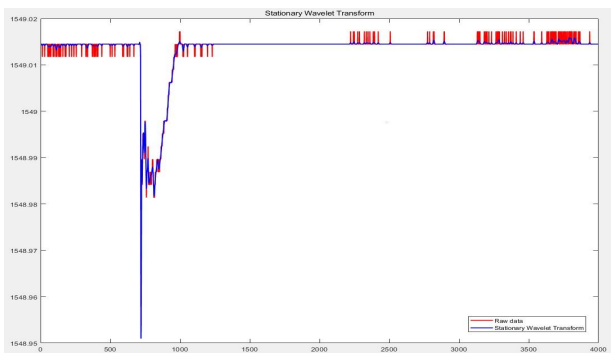


그림 11. Hard threshold를 이용한 잡음제거 (db2 wavelet, level3)
Fig. 11. Noise reduction using hard threshold (db2 wavelet, level3)

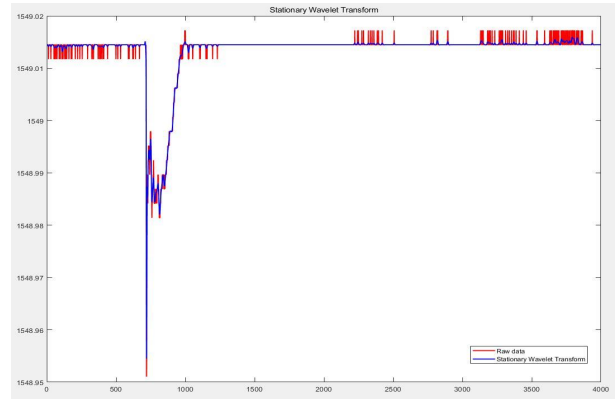


그림 12. Soft threshold를 이용한 잡음제거 (db2 wavelet, level3)
Fig. 12. Noise reduction using soft threshold (db2 wavelet, level3)

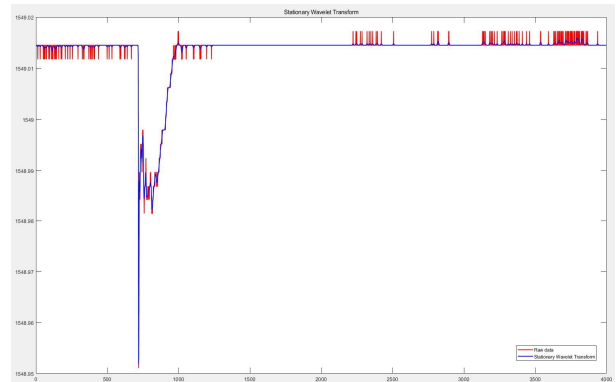


그림 13. Hard threshold를 이용한 잡음제거 (haar wavelet, level3)
Fig. 13. Noise reduction using hard threshold (haar wavelet, level3)

VI. 결 론

본 논문에서는 복합재 내부에 FBG 센서를 설치한 항공기를 이용하여 충격실험을 수행하였고, 최대 충격량을 보존하기 위해 일반적으로 많이 사용되었던 soft threshold 대신 hard threshold를 적용하였다. 잡음이 많은 센서의 잡음을 제거하기 위해 웨이블릿 패킷 변환과 정상 웨이블릿 변환기법을 적용하여 비교하였다. 이산 웨이블릿 변환이 단순히 저대역 부분만 분석하는 것과 달리 웨이블릿 패킷 변환은 다 해상도 분석을 일반화시켜 더 높은 분해능을 갖는다. 하지만 웨이블릿 패킷 변환에서는 다운 샘플링의 과정을 거치기 때문에 이동 변이 특성으로 인하여 신호 왜곡이 발생하는 것을 확인하였다. 반면에 정상 웨이블릿 변환은 다운 샘플링의 과정을 거치지 않으므로 이동 불변의 특성을 가진다. 따라서 신호 왜곡이 적으며 웨이블릿 패킷 변환과 비교하였을 때 전반적으로 잡음 제거 능력과 최대 충격량을 보존하는 능력이 탁월한 것을 확인하였다. 이에 잡음 제거

도 필요하지만, 최대 충격량을 보존해야 할 필요성이 있는 시스템에서는 hard threshold를 적용하여 정상 웨이블릿 변환을 이용하면 보다 효율적일 것이다. 따라서 본 연구에서 적용된 기법을 비행시험에 적용하면 보다 정확한 충격에 따른 물리량을 계측할 수 있을 것으로 판단된다.

Acknowledgments

이 논문은 2018년도 한서대학교 교내연구과제 지원사업에 의하여 연구되었음.

References

- [1] G. H. Lee, A study on structural health monitoring of solar powered aircraft composite wings using fiber bragg grating Sensors, Master's degree, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, 2013.
- [2] M. R. Ham, H. S. Choi, and W. J. Choi, "The emergence of composite material aircraft and review of technical," *Korea Association of Defense Industry Studies*, Vol.16, No.2, pp.259-283, 2009.12.
- [3] S. W. Park, H. J. Yoon, S. O. Park, J. Y. Song, and C. G. Kim, "Design scheme of FBG sensor system for aircraft application," in *2005 Korea Composite Materials Society Fall Conference*, Daegu: Korea, pp. 215-218, 2005.11.
- [4] G. C. Kahandawa, J. Epaarachchi, H. Wang, and K. T. Lau, "Use of FBG Sensors for SHM in aerospace structures," *Photonic Sensors*, Vol. 2, No.3, pp. 203-214, 2012.
- [5] S. W. Kim, S. J. Yoo, E. Lee, I. B. Kwon, and D. J. Yoon, "Adhesive layer monitoring of composite structures using embedded FBG sensors," in *Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Conference*, Gyeongju: Korea, pp. 294-299, 2011.
- [6] X. Zhou, C. Zhou, and B. G. Stewart, "Comparisons of discrete wavelet transform, wavelet packet transform and stationary wavelet transform in denoising PD Measurement data," in *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Toronto: Canada, pp. 237-240, 2006.6.
- [7] S. H. Kim, K. S. Choi and G. Y. Hong, "Spike rejection method for improving altitude control performance of quadrotor UAV using ultrasonic rangefinder," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 20, No. 3, pp 1-5, 2016.6.
- [8] I. J. Kim, A new method for selecting thresholding on wavelet packet denoising, Master's degree, Hanyang University, Seoul, Korea, Dec. 2000.
- [9] S. H. Kim and G. Y. Hong, "Ultrasonic Rangefinder Spike Rejection Method Using Wavelet Packet Transform," *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 20, No. 4, pp 298-304, 2016.8.
- [10] S. H. Kim, Spike rejection method of quadrotor UAV using ultrasonic rangefinder, Master's degree, Hanseo University, Korea, 2017.2.
- [11] J. S. Sim, Efficient hardware design for discrete wavelet transform algorithm, Master's degree, Kyunghee University, Seoul, 2004.2.
- [12] M. G. Sumithra and K. Thanushkodi "Performance evaluation of different thresholding methods in time adaptive wavelet based speech enhancement," *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 5, pp.439-447, Dec. 2009.
- [13] G. H. Lee, A Study on structural health monitoring of solar powered aircraft composite wings using fiber bragg grating sensors, Master's degree, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea, 2013.
- [14] H. J. Park, Modal identification and damage detection of structures using fiber bragg grating sensors, Master's degree, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Daejeon, Korea, 2006.
- [15] H. S. Shin, "Abnormal Detection of CTLS Aircraft Wing Structure using SWT", *The Journal of Advanced Navigation Technology*, Vol. 22, No. 5, pp. 359-366, 2018.



손 영 준 (Yeong-Jun Son)

2018년 2월 : 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)

2018년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 대학원 항공시스템공학과

※관심분야 : 항공전자, 비행시험



신 현 성 (Hyun-sung Shin)

2017년 9월 : 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)

2017년 9월 ~ 2019년 2월 : 한서대학교 대학원 항공시스템공학과 (공학석사)

2019년 3월 ~ 현재 : (주)유콘시스템 연구원

※관심분야 : 항공기 시스템, 비행시험



홍 교 영 (Gyo-Young Hong)

1993년 3월 ~ 2001년 : 대한항공 항공기술연구소 선임 연구원

2001년 9월 ~ 현재 : 한서대학교 항공전자공학과 교수

※관심분야 : 비행시험, 항공통신, 항공기 시스템