

기준신호 데이터를 이용한 보강된 복합재 구조물에서의 저속 충격위치 탐색

김윤영*[†] · 김진혁* · 박유림* · Pratik Shrestha* · 권희중* · 김천곤*

Low-speed Impact Localization on a Stiffened Composite Structure Using Reference Data Method

Yoon-Young Kim*[†], Jin-Hyuk Kim*, Yurim Park*, Pratik Shrestha*,
Hee-Jung Kwon*, Chun-Gon Kim*

ABSTRACT: Low-speed impact was localized on a stiffened composite structure, using 4 FBG sensors with 100 kHz-sampling rate interrogator and devised localization algorithm. The composite specimen consists of a main spar and several stringers, and the overall size of the specimen's surface is about 0.8×1.2 m. Pre-stored reference data for 247 grid locations and 36 stiffener locations are gathered and used as comparison target for a random impact signal. The proposed algorithm uses the normalized cross-correlation method to compare the similarities of the two signals; the correlation results for each sensor's signal are multiplied by others, enabling mutual compensation. 20 verification points were successfully localized with a maximum error of 43.4 mm and an average error of 17.0 mm. For the same experimental setup, the performance of the proposed method is evaluated by reducing the number of sensors. It is revealed that the mutual compensation between the sensors is most effective in the case of a two sensor combination. For the sensor combination of FBG #1 and #2, the maximum localization error was 42.5 mm, with average error of 17.4 mm.

초 록: 본 연구에서는 4개의 FBG 센서가 설치된 보강된 복합재 구조물을 시편으로 사용하여, 충격해머로 가해진 저속 충격 위치를 탐색하였다. 100 kHz의 데이터 샘플링 속도를 가진 FBG 인터로게이터를 사용하였으며, 제안된 알고리즘을 통해 예상 충격위치를 계산하였다. 복합재 시편은 주 스파(Spar)와 몇 개의 스트링거(Stringer)를 포함하며 전체 면적은 0.8×1.2 m이다. 247개의 격자점과 36개의 보강재 지점에 대한 기준신호 데이터를 얻었으며, 이는 임의의 충격신호에 대한 비교대상이 되었다. 제안된 알고리즘은 normalized cross-correlation을 사용하여 두 신호의 상호 유사성을 판독하는 방식으로 작동한다. 각각의 센서 신호로부터 얻어진 correlation 결과는 서로 곱연산되어 상호 보상적인 방법으로 사용되었다. 성능평가를 위해 대상 영역에 대한 20개의 임의의 충격시험을 수행하였다. 시험결과 성공적으로 충격위치를 탐색할 수 있었으며, 4개 센서신호를 사용하여 최대 오차 43.4 mm와 평균 오차 17.0 mm의 성능을 얻었다. 같은 시험에 대하여 사용된 센서의 개수를 변화시켜 가며 그 성능의 변화를 알아보았다. 두 개의 센서를 사용하였을 때 상호 보상적 효과가 최대가 됨을 확인하였으며, 2개의 센서(1, 2번 센서)의 조합으로 최대 오차 42.5 mm와 평균 오차 17.4 mm의 성능을 얻을 수 있었다.

Key Words: 충격위치 탐색(Impact localization), 보강된 복합재 구조(Stiffened composite structure), FBG 센서(Fiber Bragg grating sensor), 정규화된 상호 상관관계(Normalized cross-correlation)

Received 6 July 2015, received in revised form 23 February 2016, accepted 24 February 2016

*Department of Aerospace Engineering, KAIST

*[†]Department of Aerospace Engineering, KAIST, Corresponding author (E-mail: yyoungkim@kaist.ac.kr)

1. 서 론

복합재료는 금속재에 비해 상대적으로 높은 비강성(Specific stiffness), 비강도(Specific strength) 및 우수한 내피로(Fatigue resistance) 특성을 가지기 때문에 최근 항공 및 우주 구조물의 주요 소재로 널리 사용되면서 기체의 경량화 및 비용절감에 크게 기여하고 있다[1].

하지만 복합재 구조물의 파손 모드는 금속 재료에 비해 매우 다양하며 실제 파손이 발생하게 되면 이들이 모두 혼합되어 나타나는 특성이 있어 그 예측이 어렵다. 특히 외부 물체와의 충돌에 의해 발생하는 충격 손상은 BVID(Barely visible impact damage)를 발생시켜, 복합재 구조물의 효율적인 유지보수를 어렵게 하는 요인이 된다[2,3]. 따라서 운용 중 충격이 가해졌을 때, 손상발생 가능성이 있는 충격 위치를 미리 판단할 수 있다면 이와 같은 유지보수 비용을 크게 절감할 수 있게 된다.

구조물에 가해진 충격위치를 탐색한 연구로서 FBG 센서가 설치된 보강된 복합재 구조물에서 normalized cross-correlation 알고리즘을 사용하여 충격위치를 예측한 연구가 있다[4]. 이 연구에서는 50 mm 간격의 격자형태 기준신호 데이터를 사용하여 평균 50 mm 이내의 오차로 충격위치를 예측하였다. 그러나 spar 등 보강재가 있는 위치에서 충격 에너지 분산으로 인해 오차가 크게 나타났으며 이에 대한 해결책이 요구된다.

같은 알고리즘을 사용하여 더 적은 수의 FBG 센서로 충격위치 탐색 정확도를 높인 연구결과들이 있다[5,6]. 이 연구들에서도 마찬가지로 일정 간격의 격자에 대한 신호를 기준신호 데이터로 사용하였고, 각 센서의 correlation coefficient를 독립적으로 더하여 사용하였다. 따라서 적은 수의 센서를 사용해서도 충분히 좋은 결과를 얻을 수 있었지만 반대로 말해서 센서의 개수가 증가함에 따라 탐색결과의 분해능이 크게 바뀌지는 않았다.

본 연구에서는 다수의 FBG 센서로부터 취득한 변형률 데이터를 상호 보완적으로 사용함으로써 센서의 개수가 증가함에 따라 충격위치 탐색결과의 분해능을 크게 개선시키는 방법을 적용하였다. 그리고 복잡한 형상의 복합재 구조물에 대하여 spar 등 보강재가 있는 부분에 대한 기준신호 데이터를 기존의 격자위치에 대한 기준신호 데이터에 추가함으로써 보강재 위에서의 충격에 대한 탐색 정확도를 높이려고 시도하였다.

2. 이론 전개

2.1 Cross-correlation을 이용한 충격위치 탐색

시간에 대한 두 함수 f, g 의 cross-correlation은 다음과 같이 정의된다.

$$(f \otimes g)(\tau) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(t+\tau)dt \quad (1)$$

여기서 f 와 g 의 절대값을 시간에 대해 적분한 값을 각각 F 와 G 라고 하면, 다음의 식 (2)와 같이 normalized cross-correlation을 정의할 수 있다.

$$C(t) = \left(\frac{f \otimes g}{F \otimes G} \right)(t) = \frac{1}{FG}(f \otimes g)(t) \quad (2)$$

본 연구에서 normalization을 사용하는 이유는, 충격의 세기가 변하더라도 그 correlation 결과에 영향이 없도록 하기 위함이다. 신호의 상관관계가 높을수록 $C(t)$ 의 값이 높기 때문에, 탐색하고자 하는 충격신호와 기준신호 데이터에 대하여 이 값이 최대가 되는 점을 찾는 방식으로 충격위치를 정할 수 있다.

2.2 다수의 센서에 대한 상호보완적 분해능 개선

식 (2)에서 t 는 지연시간을 나타낸다. 다수의 센서를 사용하게 되면 위치가 다른 각각의 센서에 대하여 충격신호가 도달하기까지 걸리는 시간이 다르다. 때문에 이 지연시간을 모든 센서 신호에 대해 하나의 축으로 묶어서 $C(t)$ 의 값을 계산해야 더욱 의미있는 결과를 얻을 수 있다. 그리고 이 때 다수의 센서 신호에 대해 얻어지게 되는 $C(t)$ 의 값을 선형적으로 더하는 것이 아닌 곱하는 방법을 사용하게 되면 하나의 센서 신호에서 우연적으로 발생할 수 있는 correlation의 local maximum을 다른 센서 신호로써 제거할 수 있게 되어 전체적으로 분해능이 크게 향상될 수 있다.

$$C_c(t) = C_1(t) \cdot C_2(t) \cdot C_3(t) \cdot C_4(t) \quad (3)$$

따라서 네 개의 센서 신호에 대해 위의 식 (3)과 같이 $C(t)$ 를 구하고, 지연시간 t 에 대하여 이 값이 최대가 될 때의 값 C_{MAX} 을 결과로 얻었다.

3. 실험 구성 및 방법

3.1 충격실험 구성

다음의 Fig. 1과 같은 실험을 구성하였다. 충격시험에 사용한 시편은 항공기에 사용되는 복합재 날개의 일부분을 재현한 구조물로서, main spar와 stiffener를 포함한다. 위쪽에 $800 \times 1200 \text{ mm}^2$ 의 곡면이 있고, 이 위에 $600 \times 900 \text{ mm}^2$ 의 면적에 대하여 50 mm 간격으로 그리드를 표시하였다. 표시된 영역의 가장자리에 다중화된 4개의 FBG 센서를 표면 부착 설치하였다. (주)파이버프로의 SFI-710 interrogator를 사용하여 FBG의 중심파장 신호를 100 kHz의 sampling rate로 획득하였다. Fig. 2에 검은 점으로 표시된 각각의 그리드 위치 247개와, 파란 점으로 표시된 보강재 위의 위치 36개

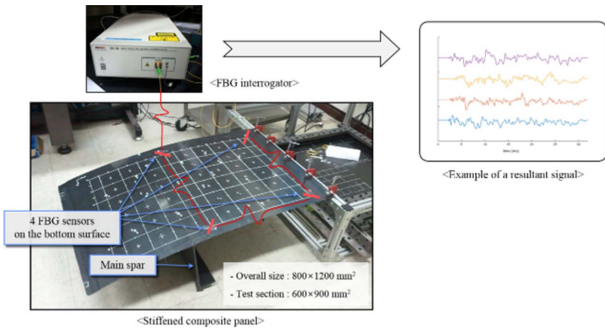


Fig. 1. Experimental setup for verification test

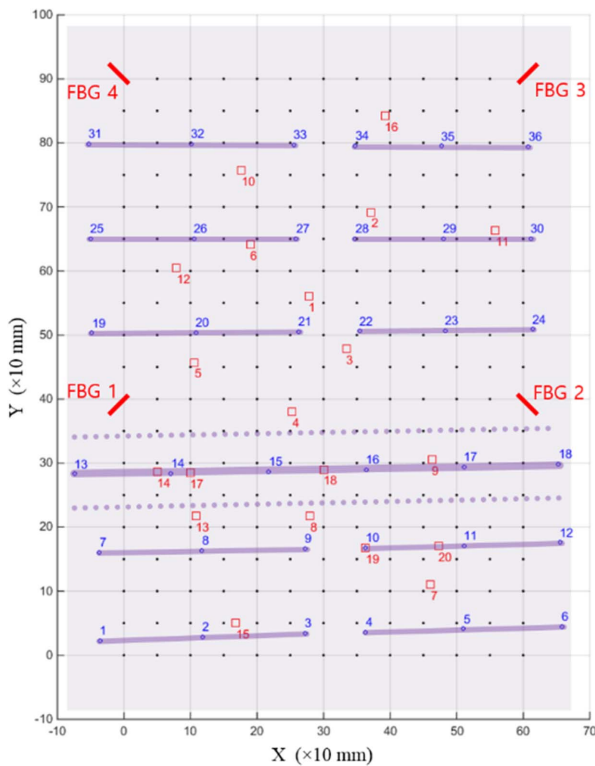


Fig. 2. Top-view of the target structure indicating stiffener positions, test section, sensor positions, reference point positions, and 20 random impact locations for verification

에 대하여 reference data를 취득하였다. 검증을 위해 20개의 미지의 충격위치에 대한 충격신호를 얻고, 이들의 충격 위치를 제안된 알고리즘을 통해 계산하여 실제 위치와 비교하였다. 검증을 위한 20개의 임의 충격위치는 Fig. 2에서 빨간 사각형으로 나타내었다.

3.2 데이터 프로세싱

획득한 충격신호는 55 ms의 데이터 길이를 가지며, 네 개의 센서 중 가장 빠른 충격과 도달시간을 기준으로 30 ms의 길이로 일괄적으로 전처리하였다. 이 과정에서 normalization을 하였고, 고주파 노이즈를 제거하였다. 그런 다음, 앞에

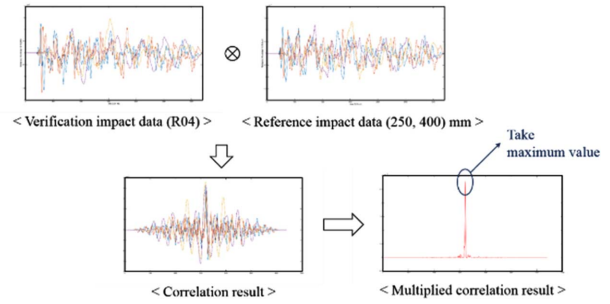


Fig. 3. Conceptual diagram for data processing sequence

서 언급한 바와 같이 탐색 대상 신호와 기준신호의 cross-correlation을 계산하고, 최대값을 그 기준신호 지점에서의 correlation coefficient로 설정하였다. 다음의 Fig. 3에 이 과정을 나타내었다. 마지막으로 각 위치에 대한 correlation coefficient 값들을 3차원 그래프로 mapping 하여 이미지화 하였고, correlation coefficient 값이 가장 높은 점의 75% 이상 크기를 가지는 모든 점들의 centroid를 구하여 최종 충격 예상 위치를 계산하였다.

4. 결과

4.1 상호보완적 분해능 개선 결과

임의의 위치에서의 충격신호와 이에 가장 가까운 기준신호 데이터에 대해서, 4개 센서의 $C_c(t)$ 값을 선형적으로 더했을 때의 $C_c(t)$ 와, 곱했을 때의 $C_c(t)$ 값을 각각 다음의 Fig. 4-(a), 4-(b)에 나타내었다. 곱했을 때 주요 피크가 더 잘 드러나는 것을 확인할 수 있다.

또한 임의의 충격신호(R01)에 대해 선형적으로 더하는 방식과 곱한 방식에 대한 각각의 C_{MAX} 결과를 Fig. 4-(c), 4-(d)에 나타내었다. 역치값 조절을 통해 결과적으로 예측한 충격위치 및 오차는 크게 차이가 없지만, 곱하는 방식을 사용했을 때 상관관계가 없는 다른 위치의 C_{MAX} 값과의 대비가 더욱 뚜렷하게 드러남을 확인할 수 있다. 이를 통해 본 연구에서 사용한 상호보완의 개념이 알고리즘 상에 성공적으로 적용되었음을 확인할 수 있다.

4.2 충격위치 탐색결과

제안된 알고리즘을 사용하여 얻은 위치 탐색 결과와, 실제 충격위치와의 오차를 Table 1에 나타내었다. 임의의 (Random) 충격위치에 대한 시험이라는 의미에서 각 시험 번호 앞에 R을 붙여 R00의 형식으로 표현하였다. 그리고 이 결과를 Fig. 5에 각각의 위치와 함께 나타내었다.

평균 17.0 mm, 최대 43.4 mm의 오차로 성공적으로 충격 위치를 탐색할 수 있었다. Fig. 6에 대표적인 네 경우에 대한 correlation coefficient map을 나타내었다. 파란색 원이 실제 충격위치이고, 빨간색 원이 계산된 충격위치를 나타낸

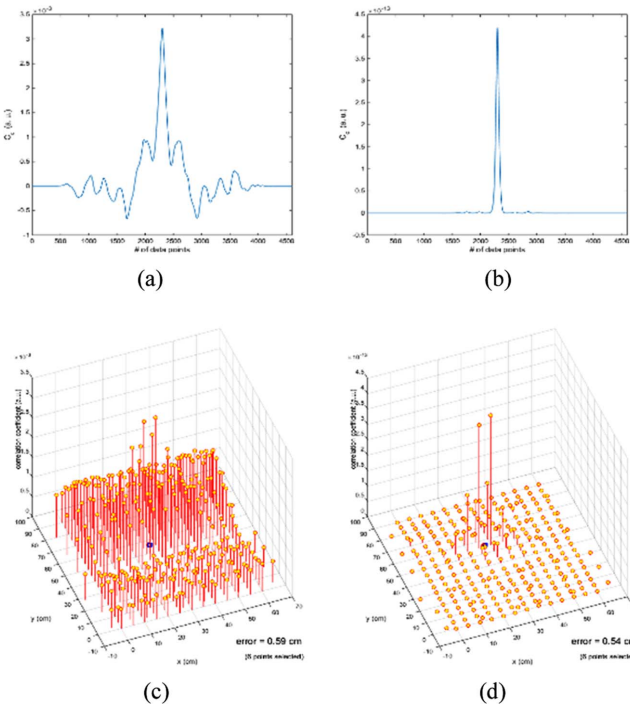


Fig. 4. $C_c(t)$, C_{MAX} result comparison between summation method and multiplication method (R01 case)

Table 1. Impact localization error (unit: mm)

R01	R02	R03	R04	R05	R06	R07	R08	R09	R10
2.6	8.0	19.5	20.2	9.2	28.9	16.7	36.8	8.7	7.0
R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20
34.6	6.5	9.8	43.4	4.9	13.7	29.0	2.1	0.0	38.0

Average: 17.0 mm

다. 실제 충격위치를 중심으로 correlation coefficient 값들이 높게 나타나는 것을 볼 수 있다.

4.3 Normalization의 효과

Normalization의 효과를 관측하기 위해, 위에서 제시한 네 가지 대표적인 경우에 대해 normalization 과정을 생략하고 충격위치 탐색을 시도하였다. 그 결과 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있었으며, Fig. 6와 Fig. 7의 비교를 통해 전체적으로 normalization을 통해 탐색오차가 크게 줄어든다는 것을 확인할 수 있다.

4.4 보강재 지점 기준신호를 추가한 효과

보강재 지점에서 나타나는 에너지 분산효과 때문에 main spar 등의 위치에 가해진 충격은 그 탐색오차가 크게 나타나는 경향이 선행 연구에서 관찰되었다[4]. 이를 보완하기 위해 본 연구에서는 36개 지점의 보강재 부분들에 대해 추가적으로 기준신호 데이터를 얻었다. 그 결과 main spar에

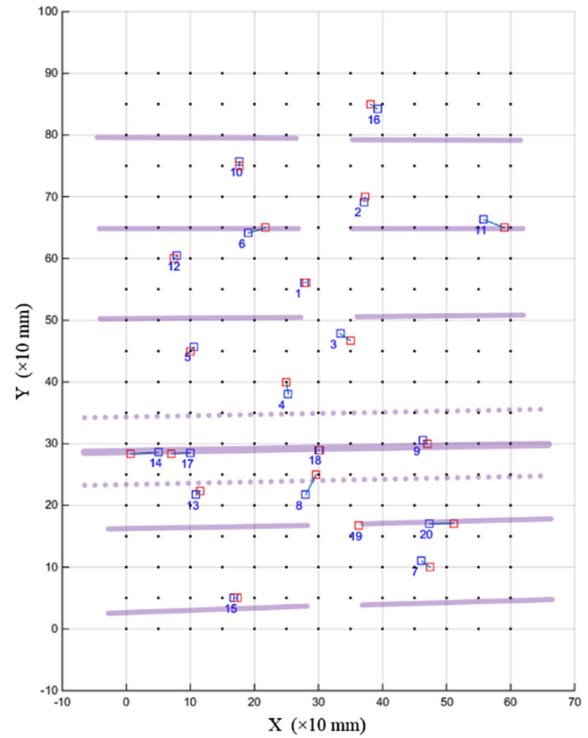


Fig. 5. Impact localization results for 20 verification points

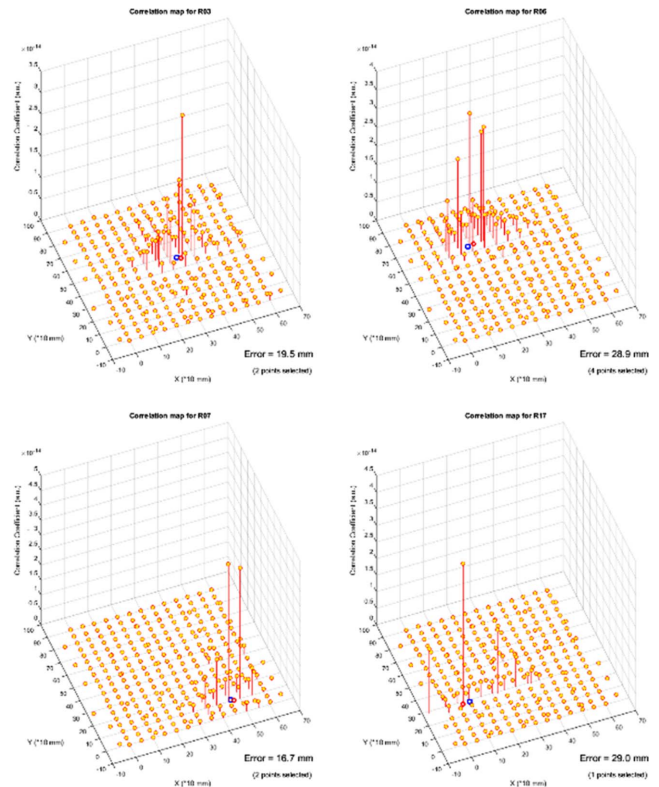


Fig. 6. Resultant correlation coefficient map with relevant actual impact location & estimated impact location (R03, 06, 07, 17 case)

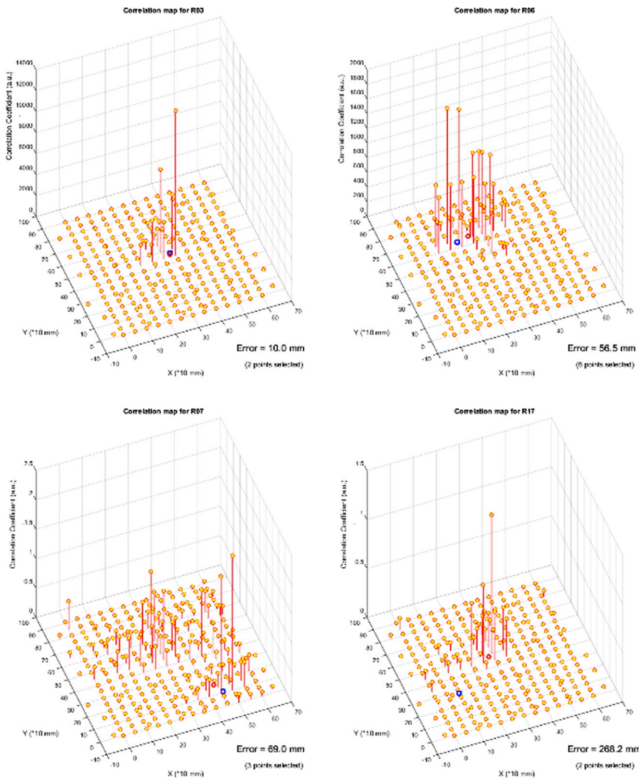


Fig. 7. Results without normalization (R03, 06, 07, 17 case)

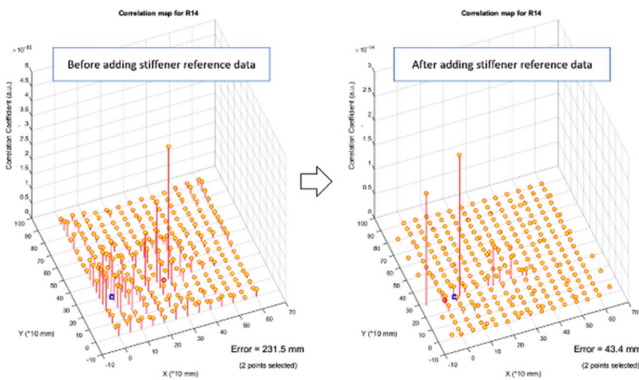


Fig. 8. Comparison of before/after adding stiffener reference points, for impact localization results in R14 case

가해진 충격에 대해 오차가 크게 줄어들었으며, 대표적인 R14의 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

4.5 감소된 센서개수에 따른 결과

보다 큰 구조물에 대한 적용가능성을 검토하기 위해, 사용한 센서의 개수를 1개에서 4개까지 변화시켜 가며 충격 위치 탐색을 수행하였다. 이 때 최종 예상위치를 계산할 때 사용한 75%의 threshold 값을 50%로 변경하여 적용하였으며, 다음의 Table 2와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

각 센서 개수에 대한 오차 분포를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타

Table 2. Results for reduced number of sensors, with modified version of algorithm

	Sensor Combination	Average Error (mm)	Maximum Error (mm)
1 sensor	1	38.6	223.0
	2	39.2	150.0
	3	35.8	117.0
	4	43.4	195.0
2 sensors	1, 2	17.4	42.5
	1, 3	19.9	47.0
	1, 4	21.6	93.1
	2, 3	17.7	46.8
	2, 4	17.8	48.2
	3, 4	22.9	92.4
3 sensors	1, 2, 3	22.5	64.0
	1, 2, 4	19.8	44.0
	1, 3, 4	20.4	48.3
4 sensors	2, 3, 4	19.4	48.0
4 sensors	1, 2, 3, 4	23.4	64.0

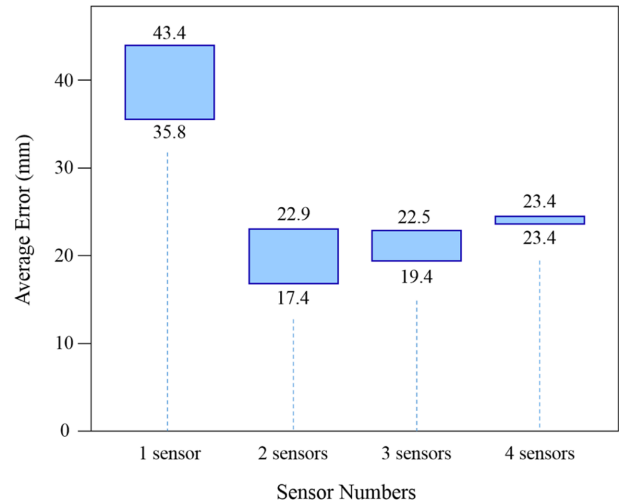


Fig. 9. Average error distribution diagram for results with reduced number of sensors

내었다. 센서 2개를 사용했을 때 오차의 감소폭이 가장 컸으며 그 이상의 센서 개수로 갈수록 오차는 거의 변하지 않음을 확인할 수 있다. 특히 평균 오차의 경우 모든 경우에 대하여 50 mm 이내의 결과를 얻었다.

센서 개수의 변화를 통해 제시한 알고리즘의 상호보상 효과를 Fig. 11에 나타난 바와 같이 확인할 수 있다. 센서 하나를 사용한 경우 correlation coefficient의 대비가 크지 않지만, 여기에 하나의 센서를 추가하여 두 개의 센서를 사용하게 되면 충격위치에 대한 분해능이 크게 증가하고 이를 통해 훨씬 수월한 위치 탐색이 가능하게 된다. 세 개와 네 개

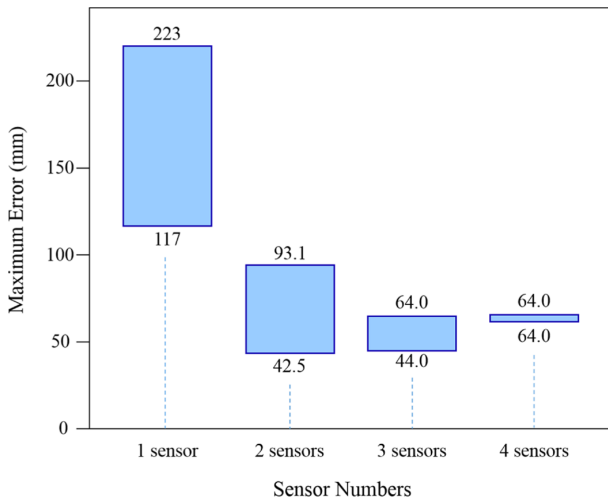


Fig. 10. Maximum error distribution diagram for results with reduced number of sensors

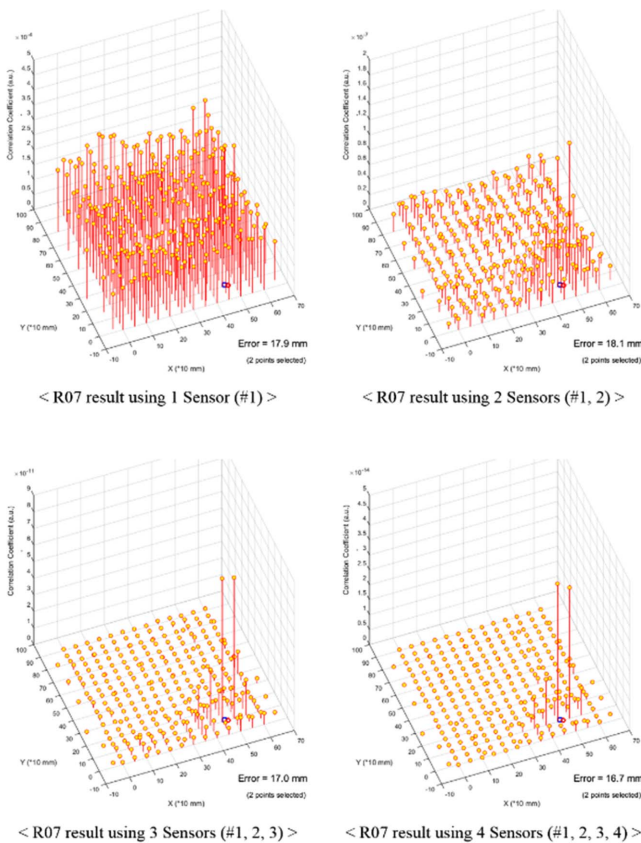


Fig. 11. Correlation coefficient map for verification case R07, with changing of the numbers of sensors used

의 센서를 사용했을 때는 분해능이 더욱 증가한다.

5. 결론

복잡한 형상의 보강된 복합재 구조물에 FBG 센서를 설치하고 이를 이용하여 구조물에 충격이 가해졌을 때 충격 위치를 탐색하는 방법을 시험하였으며, 알고리즘의 최적화를 통해 위치탐색의 분해능을 높일 수 있었다. Normalized cross-correlation을 통해 손으로 충격을 주었을 때 발생할 수 있는 충격 세기 변동을 극복하고 성공적으로 위치를 탐색하였다. 또한, 보강재 지점에서의 에너지 분산효과를 극복하기 위해 기존의 기준신호 데이터에 보강재 지점에 대한 기준신호를 추가하여 main spar 등 보강재 지점에 가해진 충격에 대해서 오차를 크게 줄일 수 있었다. 특히, 제시된 알고리즘은 상호 보완적 방법을 사용해 센서의 개수에 따라 분해능이 크게 증가하는 특징이 있으며, 이는 앞으로 복합재 구조에 대한 구조 건전성 모니터링 시스템에 적용됨으로써 항공기 및 기타 복합재 구조물의 효율적인 유지 및 보수, 관리에 도움을 줄 것으로 기대된다.

REFERENCES

1. Mrazova, M., "Advanced Composite Materials of the Future in Aerospace Industry," *Incas Bulletin*, Vol. 5, Issue 3, 2013, pp. 139-150.
2. Cantwell, W.J. and Morton, J., "The Impact Resistance of Composite Materials-a Review," *Composites*, Vol. 22, No. 5, 1991, pp. 347-362.
3. Richardson, M.O.W. and Wisheart, M.J., "Review of Low-velocity Impact Properties of Composite Materials," *Composites*, Vol. 27A, Issue 12, 1996, pp. 1123-1131.
4. Kim, Y.Y., Jang, B.W., Lee, Y.G., Kim, J.H., and Kim, C.G., "Detection of Impact Location on Stiffened Composite Panel Using Correlation Method," *Proceeding of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*, Yongpyong, Korea, Nov. 2011, pp. 1233-1237.
5. Kim, J.H., Kim, Y.Y., Park, Y., and Kim, C.G., "Low-velocity Impact Localization in a Stiffened Composite Panel Using a Normalized Cross-correlation Method," *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, No. 4, 2015, pp. 12.
6. Shrestha, P., Kim, J.H., Park, Y., and Kim, C.G., "Impact Localization on Composite Wing Using 1D Array FBG Sensor and RMS/correlation Based Reference Database Algorithm," *Composite Structures*, Vol. 125, 2015, pp. 159-169.