

블레이드 진동측정을 위한 스트레인 게이지 설치위치 최적화

Optimal Placement of Strain Gauge for Vibration Measurement for Fan Blade

최 병 근*

ByeongKeun Choi

(2004년 5월 3일 접수 : 2004년 7월 12일 심사완료)

Key Words : Sensor Placement(센서 설치), Strain Measurement(스트레인 측정), Blade Vibration(블레이드 진동), Optimization(최적화), Strain Gauge(스트레인 게이지)

ABSTRACT

A multi-step optimum strategy for the selection of the locations and directions of strain gauges is proposed in this paper to capture at best the modal response of blade in a series of modes on fan blades. It is consist of three steps including two pass reduction step, genetic algorithm and fine optimization to find the locations-directions of strain gauges. The optimization is based upon the maximum signal-to-noise ratio(SNR) of measured strain values with respect to the inherent system measurement noise, the mispositioning of the gauge in location and gauge failure. Optimal gauge positions for a fan blade is analyzed to prove the effectiveness of the multi-step optimum methodology and to investigate the effects of the considering parameters such as the mispositioning level, the probability of gauge failure, and the number of gauges on the optimal strain gauge position.

1. 서 론

일반적으로 터보기계의 블레이드 진동을 정확하게 측정하는 것은 블레이드상의 모드 스트레인 분포가 매우 날카로운 피크를 가지고 있고 블레이드에서 발생하는 mistuning과 같은 구조적인 특징과 회전(rotation), 유체흐름(fluid flow)과 같은 혹독한 운전 조건 때문에 다른 대부분의 구조물의 경우와는 달리 매우 어려운 일이다.

진동을 측정하기 위한 장치는 스트레인 게이지, 가속도계, 변위계, LVDTs와 레이저 vibrometer 등 여러 가지 종류가 있지만, 블레이드에는 회전 시 큰 원

심력이 발생하고 블레이드 주위에서 발생하는 공기역학적인 흐름을 방해하지 않아야 하므로 주로 스트레인 게이지를 많이 사용한다. 또한 회전부에서 발생하는 진동을 스트레인 게이지로 측정할 후 신호를 비회전부로 전달하기 위해서는 슬립링(slip ring)을 사용해야만 한다.

따라서 블레이드의 진동을 측정하기 위하여 사용할 수 있는 스트레인 게이지의 개수는 제한이 되고 측정하고자 하는 모드의 개수보다 훨씬 적은 경우가 대부분이다. 즉, 제한된 슬립링의 개수로 인하여 m 개의 서로 다른 모드의 모드 스트레인 진폭(modal strain amplitude)을 측정하기 위하여 블레이드 당 p 개의 스트레인 게이지만을 사용할 수 있다는 것이다(이때 $p < m$). 따라서 적은수의 스트레인 게이지를 사용한 측정만으로 블레이드의 스트레인 분포에 대한 정확한 정보를 얻는 것은 불가능하다. 이를 해결하기 위해 일반적으로 유한요소해석을 통하여 블레이드의 스트

* 책임저자 : 정희원, 경상대학교 기계항공공학부 해양산업연구소
E-mail : bgchoi@gsnu.ac.kr
Tel : (055) 640-3059, Fax : (055) 640-3188

라인 분포의 전체 형상을 구하고 스트레인 게이지의 측정결과를 해석결과의 스케일 인자(scale factor)로 사용한다. 스트레인 게이지를 사용하여 블레이드의 진동을 정확하게 측정하기 위해서는 게이지를 블레이드상의 최대 스트레인 방향을 따라 스트레인이 피크를 이루는 위치에 설치하여야 한다. 그러나 블레이드의 날카로운 모드 스트레인 분포 때문에 스트레인 게이지 설치 시 발생할 수 있는 설치위치나 방향에서의 약간의 위치오차(mispositioning)가 스트레인 게이지에서 스트레인 수치가 최대치보다 훨씬 작게 측정될 수도 있다. 따라서 스트레인 게이지의 최적의 설치 위치는 스트레인 레벨이 높고 위치오차에 대한 민감도가 낮은 위치이다.

스트레인 게이지 설치위치의 선택 시에 영향을 미치는 또 다른 중요한 요인은 스트레인 게이지의 잠재적 파손(potential failure)이다. 즉, 큰 원심력, 유체의 흐름과 매우 높은 온도가 복합적으로 가해지는 혹독한 운전조건 때문에 운전 중 스트레인 게이지가 설치 위치에서 이탈하는 경우가 발생한다. 따라서 스트레인 게이지의 잠재적 파손을 고려하여 스트레인 게이지 설치위치의 최적화를 수행하여야 한다.

그러나 주어진 이러한 문제의 실질적 중요성에도 불구하고 단지 몇몇 연구만이 블레이드상의 스트레인 게이지의 설치위치에 관한 문제를 다루고 있다.⁽¹⁻³⁾ Yang과 Griffin⁽¹⁾은 특히 매우 근접해 있어 구별하기가 힘든 모드를 대상으로 스트레인 게이지의 설치위치 방법을 제안하였다. 이와는 달리 Sensmeier와 Nichol^(2,3)은 모드 동정(mode identification)을 포함한 다양한 데이터처리의 관점에서 스트레인 게이지의 설치위치를 다루었다.

본 저자들은 이미 스트레인 게이지의 위치오차와 게이지 파손을 고려한 스트레인 게이지 설치위치 최적화를 위하여 *SNR* 값을 이용하여 max-min-max법에 기초를 둔 다단계 최적화법(multi-step optimization)을 제안하였으며 단순한 평판의 예를 통하여 제안한 방법의 유용성을 확인하였다.⁽⁴⁾

따라서 본 논문에서는 현장에서 사용되는 뿔 블레이드의 경우에 대하여 제안한 방법을 적용하여 유용성을 재확인하고, 설치 위치의 위치오차에 따른 블레이드의 모드특성의 변화와 게이지 파손이 스트레인 게이지 설치위치 최적화에 미치는 영향에 대하여 상세하게 조사하고자 한다.

2. Max-Min-Max법

본장에서는 스트레인 게이지의 위치오차와 게이지 파손을 고려한 스트레인 게이지 설치위치 최적화를 위하여 사용한 max-min-max법^(4,5)에 대하여 간략하게 설명한다.

일반적으로 다양성을 가지는 데이터의 값들은 다 음과 같이 정의 되는 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, *SNR*)를 통해 가장 간편하게 얻을 수 있다.

$$SNR(\epsilon) = \frac{\mu_\epsilon}{\sigma_\epsilon} \quad (1)$$

식 (1)의 정의로부터, *SNR*은 측정되는 스트레인 값의 신뢰도를 나타내는 것으로, 이 값이 클수록 스트레인 레벨에서의 측정오차가 적다는 것을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 스트레인 게이지의 잠재적 파손을 고려하지 않는 경우에, *SNR* 값을 최대화 할 수 있는 스트레인 게이지의 설치위치 *X*를 선택하기 위하여 식 (2)과 같은 max-min-max 최적화 목적함수를 사용하였고, max-min-max 원칙 내에서 게이지의 수가 증가함에 따라 발생하는 복수해의 문제점을 해결하기 위해서 순차적 최적화(sequential optimization)법을 사용하였다.^(4,5)

$$\text{Maximize } \min_j \left\{ \max_i [SNR(i, j, \underline{X})] \right\} w.r.t \underline{X} \quad (2)$$

스트레인 게이지의 잠재적 파손을 고려하는 경우 게이지의 파손은 랜덤하게 발생하며 측정 손실을 야기하고 파손된 게이지에서는 0의 *SNR* 값을 얻게 된다. 따라서 식 (2)를 *SNR(X)*의 기대치 즉, 평균 *SNR*을 최대화하는 것으로 식 (3)^(4,5)과 같이 교체를 하여 사용하였다.

$$E \left[\min_j \left\{ \max_i [SNR(i, j, X)] \right\} \right] = (1 - P_j)^p SNR_m M^{(p)} + P_j (1 - P_j)^{p-1} \left[\sum_{i=1}^p SNR_m M_i^{(p-1)} \right] + P_j^2 (1 - P_j)^{p-2} \left[\sum_{\substack{k,j=1 \\ k \neq j}}^p SNR_m M_{kj}^{(p-2)} \right] + \dots \quad (3)$$

식 (3)에서의 SNR 기대치는 식 (2)와는 달리 모든 게이지의 SNR 에 대한 함수이다. 따라서 게이지의 파손이 있는 경우는 파손이 없는 경우와는 달리 복수해의 가능성을 고려할 필요가 없어진다.

3. SNR 평가 및 스트레인 보간법

스트레인 게이지 설치 시 발생할 수 있는 위치오차의 영향을 평가하기 위해서는 게이지의 설치위치 근방에서의 스트레인 분포를 알아야 한다. 이 분포는 단지 전체 기준 프레임내의 절점에서만 모드 스트레인을 구할 수 있는 유한요소해석으로부터 직접적으로 얻을 수가 없다. 따라서 절점에서의 모드 SNR 의 평가(최초 최적화 단계에 대해서 필요한 데이터)는 다음과 같은 3개의 단계로 이루어진다.

(1) 유한요소 절점에서 블레이드에 대해 수직성분을 결정한다. 이 단계는 블레이드에 수직인 평면의 국부좌표를 정의 하는데 필요하다.

(2) 유한요소 절점 주위의 모드 스트레인을 구하기 위한 보간법을 결정한다.

(3) 위치오차와 게이지 크기를 고려한 모드 스트레인의 평균과 표준편차를 평가한다.

각 단계에 대한 자세한 내용은 저자들이 발표한 논문에 잘 설명되어 있으므로 여기서는 생략하기로 한다.⁽⁴⁻⁶⁾

4. 최적화 알고리즘^(4, 5)

본 논문에서 사용한 스트레인 게이지 설치위치 최적화법은 최적의 SNR 을 얻을 수 있는 블레이드 내에서의 위치 및 방향의 선택에 근거를 두고 있다. 이 방법은 두 단계로 이루어진다. 첫 번째로, 이산화 된 절점 내에서 스트레인 게이지의 최적의 설치위치를 탐색하는 것이다. 보다 더 정밀한 설치위치가 요구된다면 이산화 된 절점에서 찾은 최적해 주변의 절점을 이용한 보간법을 사용하여 구할 수가 있다.

이산화 된 절점 상에서의 스트레인 게이지의 설치위치 및 방향에 관한 데이터는 각각의 내부절점과 0에서 180도까지 동일하게 등분된 각도를 이용하여 얻을 수 있다. 따라서 SNR 값이 많은 국부적인 최대값(local maxima)을 가질 것으로 예상이 되므로 스트

레인 게이지의 설치위치 및 방향에 대한 데이터는 매우 클 것으로 예상된다. 본 논문에서는 최적화에 소요되는 시간을 줄이기 위해서, 우선 사용 데이터의 크기를 줄이는 방법을 사용하였다. 또한 국부 최대값의 문제를 해결하기 위하여 최적화 방법으로 유전알고리즘(GA)을 사용하였다.

4.1 양방향 데이터 축소법

고려하는 각 모드에 대해 서로 다른 두개의 위치와 방향의 SNR 값을 비교하여, 만일 두 번째 위치와 방향의 SNR 값이 첫 번째 것에 비해 모두 적으면, 게이지의 파손가능성이 같다면, 두 번째 위치와 방향은 최적해의 일부가 될 수가 없으므로 두 번째 위치와 방향은 데이터 집합으로부터 제거되어질 수 있다. 이와 같은 단순한 과정은 전체 데이터 집합을 통해서 두 번 즉, 전 방향 비교(forward passing)와 후 방향 비교(backward passing)로 이루어진다. 전 방향 비교에서는 최초의 위치와 방향에서 출발하여 다른 모든 위치와 방향의 SNR 값과의 비교를 통하여 데이터를 축소한다. 그리고 후 방향 비교는 전 방향 비교와 유사한 방법으로 진행되지만 전 방향 비교를 통하여 축소된 데이터를 사용하고 출발점이 축소된 데이터의 마지막 위치와 방향에서부터 SNR 값의 비교를 시작한다. 매우 간단한 방법이지만, 데이터 축소 과정은 아주 효과적임을 알 수 있다.

4.2 유전알고리즘

GA는 세대를 통한 개체집단(스트레인 게이지의 위치와 방향)의 진화에 근거를 둔 최적화방법이다. 그리고 설계변수(위치와 방향)가 이산화 되어있고 다수의 최적해가 존재 할 수 있는 스트레인 게이지 설치위치 최적화에 유용할 것으로 판단이 된다.^(7, 8) 따라서 본 논문에서는 최적화 알고리즘으로 전역 최적해 탐색에 이점을 가지고 있고, 기존에 블레이드와 블레이드 디스크의 최적화에 관하여 발표된 논문^(4-6, 9, 10)을 통하여 최적화 성능이 확인된 GA를 사용하였다.

4.3 미세 최적화

유한 요소 격자에 의해 제공되는 것보다 더 세밀한 설치위치를 찾기 위해서 GA에서 찾은 최적 위치의 주위 8개 절점의 내부를 Lagrangian 보간 다항식^(4, 5)

을 이용하여 세밀하게 보간하여 영역내의 SNR 을 다시 구하고 GA에서 구한 최적 위치와 방향을 초기 시작점으로 하여 MATLAB (v5.0)에서 제공하는 함수 $constr$ 을 이용하여 미세 최적화(fine optimization)를 수행하였다.

5. Fan Blade

제한된 스트레인 게이지의 설치위치 최적화법의 유용성을 확인하기 위해 현장에서 사용하는 팬 블레이드(fan blade)에 적용하였다. 유한요소해석은 ANSYS를 사용하였고 총 4830개의 8 절점 블록(node blocks), 7560개 절점, 그리고 최초 5개의 진동 모드를 고려하였다. 블레이드의 pressure side의 각 모드에 대한 스트레인 분포를 Fig. 1에 나타내었고, 위치오차의 표준편차 변화에 따라 각 모드에 대해서 얻어진 최대 SNR 값을 Fig. 2에 나타내었다.

Fig. 2에서 모드 2와 3의 특성과 모드 1과 5의 특성에는 차이가 있음을 알 수 있다. 전자의 모드에 대해서, 즉 모드 1과 5의 경우 SNR 피크는 위치오차의 수준이 증가함에 따라 천천히 완만하게 감소한다. 그러나 그와는 반대로 모드 2와 3의 경우, 초기에는 급격히 감소하지만 이러한 경향이 갑자기 변화하여 일정하게 유지되는 것이 보여 진다. 이런 경향들을 이해하기 위해서, 블레이드의 SNR 분포를 위치오차 수준이 0.762 mm (0.03 in)와 1.524 mm(0.06 in)에 대하여 해석하고 이를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3의 (a), (b)와 Fig. 1의 (c)와의 비교로부터, SNR 분포는 두개의 지배적인 피크가 존재하고, 하나는 trailing edge에 매우 근접해 있고 다른 하나는 leading edge쪽으로 향하는 것을 알 수 있다. Fig. 3의 (a)와 같이 위치오차 수준이 작은 0.762 mm의 경우, trail edge에 최대 SNR 값을 가지는 날카로운

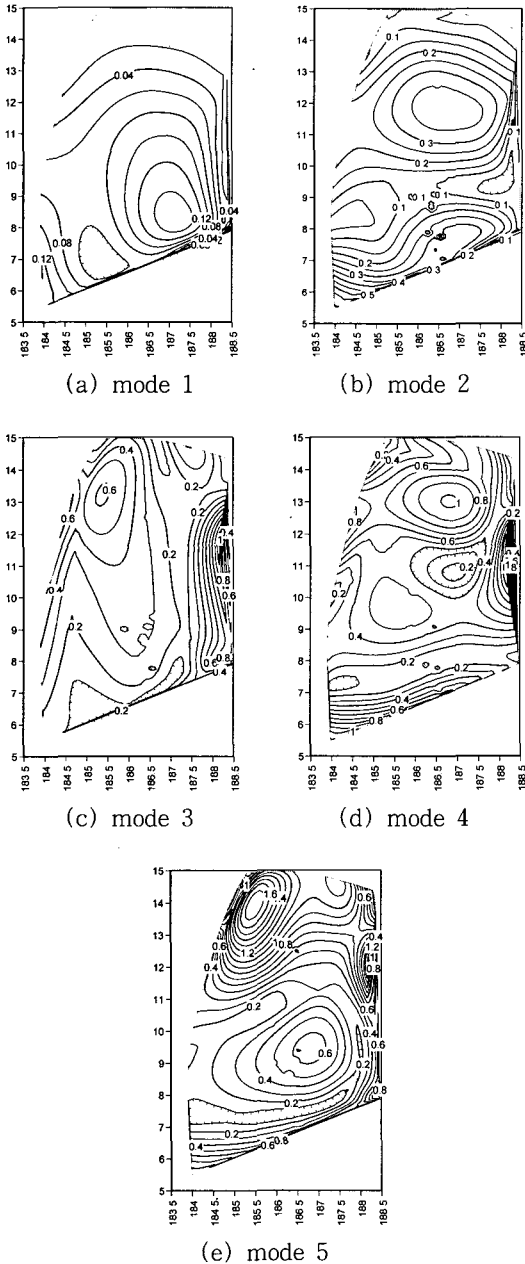


Fig. 1 Modal strain distribution for the first 5 modes of the fan blade (pressure side)

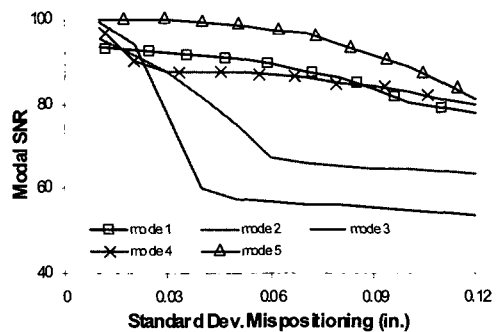


Fig. 2 Evolution of the peak modal SNR as a function of the standard deviation of mispositioning

피크를 가지지만, 위치오차 수준이 1.524 mm인 경우는 leading에 완만한 최대 피크를 가진다.

위치오차 수준이 0.762 mm는 *SNR* 피크가 급격히 감소하는 구간이고 1.524 mm는 피크가 일정하게 유지되는 구간이다. 따라서 위치오차 수준이 1.016 mm(0.04 in)와 1.27 mm(0.05 in)인 경우에 대한 *SNR* 분포의 해석을 통하여 Fig. 2의 피크 모드 *SNR* 곡선에서 급격한 감소(break)가 *SNR* 피크의 최대값이 trailing edge에서 leading edge로 이동할 때 일어남을 알 수 있다. 감소가 발생하기 전후에 위치오차 수준에 따른 *SNR* 피크의 서로 다른 감소 비율은 Fig. 1에 나타낸 스트레인 분포로부터 이해되어질 수 있다. 특히, trailing edge 피크가 매우 날카롭기 때문에 위치오차는 측정된 스트레인 값에 상당한 영향을 미칠 것이고 그 결과 *SNR*은 위치오차가 증가할수록 급격하게 감소할 것이다. 반대로, leading edge 피크는 매우 완만하기 때문에 위치오차는 Fig. 2에서 *SNR* 피크가 일정하게 유지되는 부분에서 볼 수 있듯이 미소한 영향을 미치게 될 것이다.

동일한 현상이 모드 1에서도 모드 2에서와 마찬가지로 발생하지만 *SNR* 최대 피크의 이동이 위치오차 수준이 0.254 mm (0.01 in) 이하에서 일어나기 때문에 Fig. 2에는 나타나지 않는다. 실제로, Fig. 1(a)를 보면, 모드 1에 대한 스트레인 분포는 pressure side인 leading edge의 블레이드 뿌리(blade root) 부분에 두개의 같은 피크를 가진다. 특히 모드 1

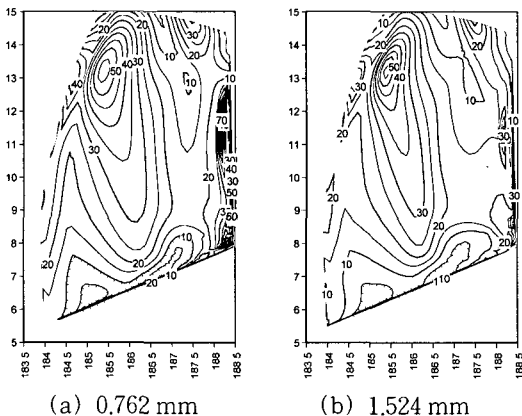


Fig. 3 Distribution of *SNR* on the pressure side of the blade for the third mode and for a standard deviation of mispositioning in location

에 대한 Fig. 2의 곡선이 위치오차 수준이 0인 지점에서 100 수렴하지 않고 있는 것으로부터 모드 1에서의 *SNR* 피크의 이동을 설명할 수 있다. 이러한 결과들로부터 스트레인 게이지의 설치위치 및 방향의 최적화과정에서 *SNR* 값 사용의 유용성을 확인할 수 있다. 따라서 max-min-max 방법은 피크 스트레인 위치를 선택하는 직관적인 규칙, 즉 피크의 날카로운 정도가 아니라 어떤 위치오차 수준에서 피크의 위치 및 방향의 이동이 발생하느냐 하는 규칙을 따를 것으로 예상되어진다.

먼저, *SNR* 값 사용의 유용성을 확인하기 위하여 게이지 파손을 고려하지 않고 최소 모드 *SNR*의 최적화를 수행하였고 그다음에 게이지 파손을 고려하였다. 위치오차의 표준편차가 1.524 mm인 경우, 유한요소로 구해진 스트레인 게이지 위치 및 방향의 총 경우의 수 166,464개가 양방향 축소법(two-pass reduction strategy)을 통하여 5,020개, 즉 원래크기의 3%로 줄여진다.

GA의 수렴 정도를 파악하기 위하여 게이지 개수가 1과 5인 경우를 우선 고려하였다. 두 경우에서, 유전 알고리즘이 예상되는 최적해를 정확하게 찾아냄을 확인하였다. GA의 세대에 따른 수렴 정도를 Fig. 4에 나타낸다.

다음으로 게이지 개수가 2, 3 그리고 4인 경우의 최적 설치위치를 고려하였고 이에 대응하는 모드 *SNR* 값을 Fig. 5에 나타내었다.

예상한대로 게이지수가 증가 할수록 모든 모드 *SNR* 값이 단조롭게 증가하고 있지만 목적함수 즉, 최소 모드 *SNR* 값은 급격하게 수렴되고 있음을 알 수 있다. 즉, 3개 혹은 그 이상의 게이지에 대해서 거

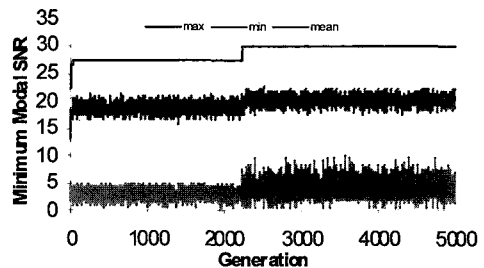


Fig. 4 Convergence plot of the genetic algorithm. Maximum, mean, and minimum value of the smallest modal *SNR* as a function of the generation number

의 일정한 값을 나타낸다. 게이지수를 4개 또는 5개로 하는 경우, 큰 모드 SNR 값을 나타내어 이미 측정이 잘 되고 있는 모드(예를 들어 모드 1, 4 와 5) 만을 개선하고 있음을 알 수 있다. 따라서 실질적인 관점에서 5개의 모드에 대해서 3개 이상의 게이지 사용은 경제성이 낮으며, 실제 현장의 경험과도 일치하는 결과이다. 또한 이러한 결과로부터 스트레인 게이지 설치위치 및 방향의 최적화에 max-min-max 방법의 유용성을 확인할 수 있다. Fig. 6에 각 게이지 개수에 대한 다단계(multi-step) 최적화법으로 찾은 블레이드내의 최적 스트레인 게이지 설치위치를 나타내었다.

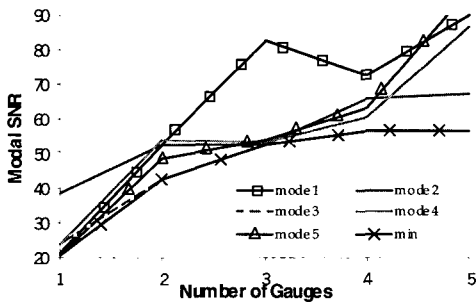


Fig. 5 Evolution of the modal SNR ratios as a function of the number of strain gauges, standard deviation of mispositioning = 1.524 mm, $P_f = 0$

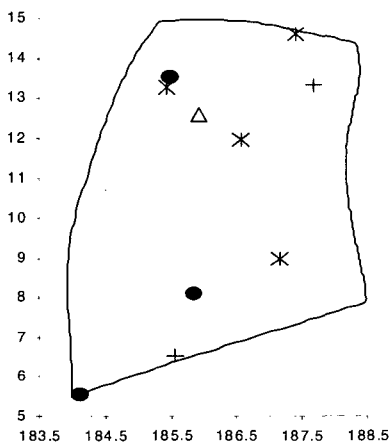


Fig. 6 Optimum strain gauge locations for 1 (Δ), 2($+$), 3(\bullet) and 4(\times) strain gauge, standard deviation of mispositioning = 1.524 mm, $P_f = 0$

다음으로 잠재적 스트레인 게이지 파손의 영향을 알아보기 위하여 게이지가 3개이고 위치오차 표준편차가 1.524 mm (0.06 in)인 경우를 고려하였다. 앞에서 다루어진 $P_f = 0$ 경우뿐만 아니라 0.1, 0.2 그리고 0.3인 경우도 고려하였다. 직관적으로 게이지 파손의 가능성이 블레이드 상에서 서로 다른 모드가 교차하는 곳에 설치된 스트레인 게이지들이 균등한 SNR 값을 나타낼 것으로 예상되어진다. 이러한 예상이 유효한지 혹은 유효하지 않는지를 확인하기 위하여, 게이지수가 3인 경우에 대하여 최적해에 대응하는 최소 모드 SNR 을 4개의 다른 게이지 파손 가능성에 대하여 Fig. 7과 같이 나타내었다.

Fig. 7은 식 (3)의 15개의 항 중에서 7개의 SNR 값만을 강조하고 $SNR_{mM}^{(p)}$, 3개의 $SNR_{mM_l}^{(p-1)}$ 항과 3개의 $SNR_{mM_{kl}}^{(p-2)}$ 항을 따로따로 고려하기 위해 데이터를 재처리하였다. 분리된 SNR 항들을 하나의 그림위에 나타내기 위해서, 임의로 200(3게이지 모두 파손이 없는 경우)과 100(하나의 게이지가 파손된 경우)이 각각 $SNR_{mM}^{(p)}$ 와 3항 $SNR_{mM_l}^{(p-1)}$ 에 더해졌다.

Fig. 7로부터 여러 가지 중요한 사항들을 알 수가 있다. 첫째로, 파손의 가능성이 적은 경우, 여전히 목적함수에 지배적인 영향을 미치는 것은 최소 모드 SNR 이다. 최소 모드 SNR 값 (Fig. 7에서 다이아몬드)은 단지 처음에만 약간 감소한다. 따라서 만약 게이지 파손이 발생하지 않는다면 0.2만큼 큰 파손 가능성을 고려하더라도 측정된 스트레인의 신뢰도에

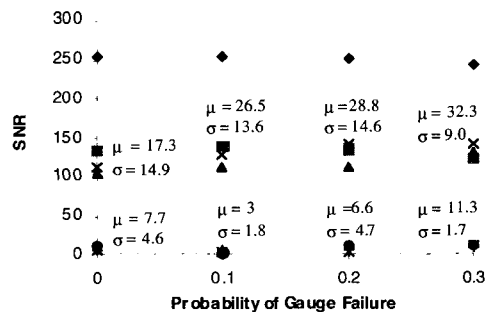


Fig. 7 Minimum modal SNR corresponding to the optimum solutions for 3 gauges as functions of the probability of gauge failure

큰 영향을 미치지 않는다는.

그와는 반대로, 만일 하나의 게이지가 파손된다면, 평균 최소 모드 SNR 값이 $P_f=0.2$ 일 때 최적해에 대해 28.8이던 것이 $P_f=0$ 일 때는 17.3으로 감소한다. 이러한 감소는 $1/28.8=3.5\%$ 에서 $1/17.3=5.8\%$ 로 스트레인 측정오차의 66%의 증가를 의미한다. 따라서 잠재적 게이지 파손을 고려할 때 게이지 파손의 가능성을 0.2 또는 그보다 작다고 가정하는 것이 적절하다는 것을 알 수 있다. 이 가능성이 0.2보다 더 큰 경우, 측정된 스트레인의 정확도에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

다음으로 하나의 게이지가 파손한 상태에서 얻어진 SNR , 즉 $SNRmM_i^{(p-1)}$ 을 고려한다. 이 값들은 Fig. 7에서 알 수 있듯이 파손 가능성이 증가 할수록 평균값들이 단조롭게 증가하고 편차(variability)는 감소한다. 따라서 하나의 게이지 파손을 고려할 경우, 게이지 파손에 매우 둔감하고 비교적 값이 큰 최소 모드 SNR 값을 얻을 수 있도록 최적해가 유도된다. 이 결과는 게이지 파손의 가능성이 서로 다른 모드간 교차하는 경우 게이지들이 균등한 SNR 값을 나타낼 것이라고 앞에서 예상한 것이 사실임을 나타낸다.

마지막으로, 비록 두개의 게이지가 파손된 경우 얻어진 SNR 값, 즉 $SNRmM_k^{(p-2)}$ 이 파손의 가능성이 낮은 경우, 목적함수에 큰 영향을 미치지 않지만, $SNRmM_i^{(p-1)}$ 경우와 동일하게 파손 가능성이 증가할수록 평균은 증가하고 표준편차는 감소하는 경향을 나타냄을 Fig. 7로부터 알 수 있다. Fig. 7에서 보여 지는 이러한 명확한 경향은 잠재적 게이지 파손을 고려한 스트레인 게이지 설치위치 방법이 직관적으로 단순하고 논리적이지만 효과적인 탐색알고리즘 없이는 최적 해를 얻을 수 없다는 것을 설명한다.

스트레인 게이지의 크기가 스트레인 게이지의 최적 설치위치 최적화에 미치는 영향을 조사하기 위하여 정사각형 게이지 크기가 0.06 in(1.524 mm)의 경우에 대하여 위치오차의 표준편차가 0.03in(0.762)와 0.06 in(1.524 mm)인 두가지 경우에 대하여 SNR 분포를 계산하였다. 두 경우 모두 스트레인 게이지의 크기가 0인 경우에 얻어진 SNR 의 분포와 거의 일치하였고 최적의 스트레인 게이지 설치위치에도 변화가 없음을 확인하였다.

6. 결론

이 논문에서는 현장에서 사용되는 헨 블레이드를 대상으로 스트레인 게이지의 최적의 설치위치 및 방향을 탐색하기 위해서 다단계 최적화법⁽⁴⁾을 사용하였고 그 유용성을 재확인하였다. 또한 설치 위치의 위치오차에 따른 블레이드의 모드특성의 변화와 게이지 파손이 스트레인 게이지 설치위치 최적화에 미치는 영향에 대하여 상세하게 조사하였다.

본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 아래와 같다.

(1) 스트레인 게이지의 잠재적 파손가능성을 고려하지 않는 경우 사용하는 max-min-max 최적화 방법은 SNR 피크의 날카로운 정도가 아니라 어떤 위치오차 수준에서 피크의 위치 및 방향의 이동이 발생하느냐 하는 규칙을 따름을 확인하였다.

(2) 게이지수의 증가에 따른 모드 SNR 값의 변화를 조사한 결과, 3개 혹은 그 이상의 게이지에 대해서 SNR 값이 거의 일정한 값을 나타내었다. 따라서 5개의 mode에 대해서 3개 이상의 게이지사용은 경제성이 낮으며, 현장의 경험과도 일치하는 결과를 얻었다. 이러한 결과로부터 스트레인 게이지 설치위치 및 방향의 최적화에 max-min-max 방법의 유용성을 확인하였다.

(3) 게이지의 잠재적 파손 파손의 가능성이 적은 경우, 목적함수에 지배적인 영향을 미치는 것은 최소 모드 SNR 이기 때문에, 만약 게이지 파손이 발생하지 않는다면 0.2만큼 큰 파손 가능성을 고려하더라도 측정된 스트레인의 신뢰도에 큰 영향을 미치지 않음을 확인하였다.

(4) 하나의 게이지가 파손되는 경우, 평균 최소 모드 SNR 값이 28.8($P_f=0.2$)에서 17.3($P_f=0$)로 감소하였고 이는 스트레인 측정오차의 66%의 증가를 의미한다. 따라서 잠재적 게이지 파손을 고려할 때, 게이지 파손의 가능성을 0.2 이하로 가정하는 것이 적절하고 이 가능성이 0.2보다 더 큰 경우, 측정된 스트레인의 정확도에 많은 영향을 미침을 알 수 있다.

(5) 스트레인 게이지의 크기는 SNR 의 분포에 거의 영향을 미치지 않았고 최적의 스트레인 게이지 설치위치에도 변화가 없음을 확인하였다.

위치오차와 게이지 파손의 영향에 대해 세부적인 정량평가는 차후의 과제로 남겨 두기로 한다.

후 기

이 논문은 2004년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

(1) Yang, M. T. and Griffin, J. H., 1988, "Theory and Methodology of Optimally Measuring Vibratory Strains in Closely Spaced Modes," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 120, No. 4, pp. 801~807.

(2) Sensmeier, M. D. and Nichol, K. L., 1998, "Optimum Placement of Sensors for Vibration Measurements of Turbine Engin Blades," *Proceedings of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, Long Beach, AIAA Paper 98~1849. CA.

(3) Sensmeier, M. D. and Nichol K. L., 2000, "Improved Vibration Monitoring Through Optimization of Sensor Placements," *The International Gas Turbine & Aeroengine Congress and Exposition*, Munich. ASME Paper 2000-GT-612. Germany.

(4) 최병근, 최창립, 양보석, 2004, "진동측정을 위한 스트레인게이지 설치위치 최적화: 최적화 방법 및 평가," *한국소음진동공학논문집*, 제 14 권, 제 8 호,

pp. 757~766.

(5) Mignolet, M. P. and Choi, B. K., 2002, "Robust Optimal Positioning of Strain gauges on Blades," *Turbo Expo 2002*, Amsterdam, The Netherlands, Jun. 3-6, Paper 2002-GT-30454.

(6) 최병근, 이현섭, 양보석, Mignolet, M. P., 2002, "Position Optimization of Strain gauge on Blades," *한국소음진동공학회 추계 학술대회논문집*.

(7) Gen, M. and Cheng, R., 1997, *Genetic Algorithms and Engineering Design*, Wiley-interscience, New York, NY.

(8) Goldberg, D. E., 1989, *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison Wesley, New York, NY.

(9) Choi, B. K., Lentz, J., Rivas-Guerra, A. J. and Mignolet, M. P., 2003, "Optimization of Intentional Mistuning Patterns for the Reduction of the Forced Response Effects of Unintentional Mistuning: Formulation and Assessment," *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, Vol. 125, No. 1, pp. 131~140.

(10) Petrov, E. P., Vitali, R. and Haftka, R., 2000, "Optimization of Mistuned Bladed Discs Using Gradient-based Response Surface Approximations," *Proc. 41st AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit*, Atlanta, GA, Apr., Paper AIAA-2000-152.